Ken Dobson
David Grace
David Lovett

Fizika

11–12 klasei

1 dalis

Ken Dobson
David Grace
David Lovett

Fizika

Išplėstinis ir tikslinis kursai

11–12 klasei

1 dalis

alma littera
Vilnius 2001

TURINYS

1 Kaip naudotis šia knyga

Skaitytojui

ŠIOJE KNYGOJE DEDAMAS pamatas sustiprintam (aukštesnio lygio) fizikos kursui. Taip pat joje pateiktos pagrindinės pasirinktinės egzaminų programų temos. Rašant knygą stengtasi perteikti moderniosios fizikos žavesį ir neatsiejamą ryšį su realiu gyvenimu, atskleidžiant galimybes pritaikyti ją įvairiose situacijose. Autorių tikslas – paskatinti jus domėtis fizika ir suteikti būtiniausias priemones galimai tolesnei veiklai fizikos srityje.

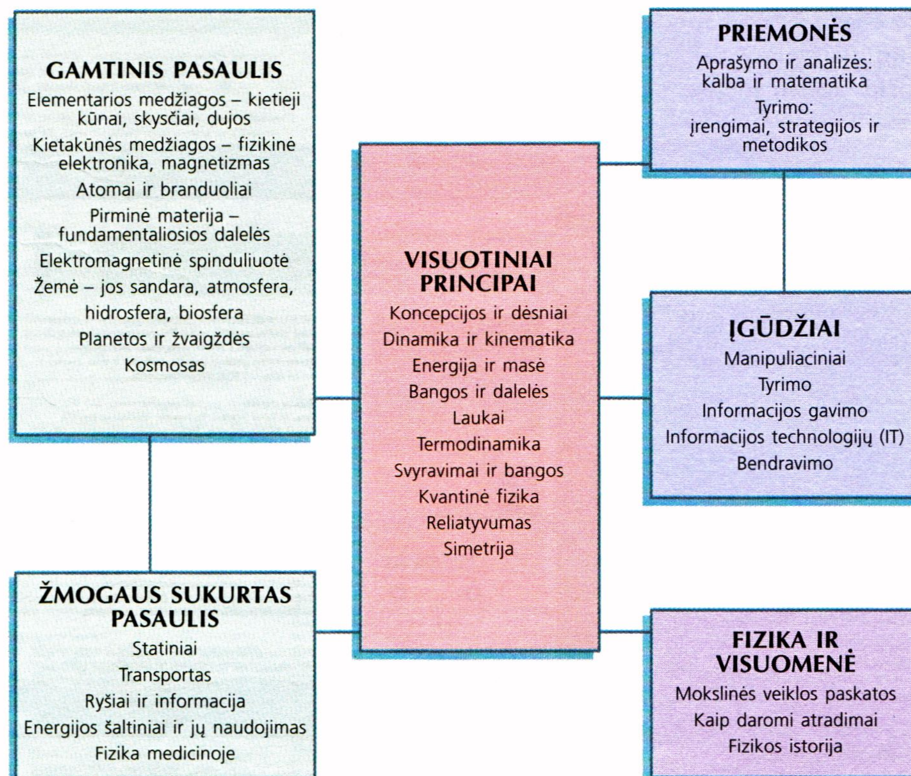
Fizika tarp kitų mokslų

Fizika – itin daug aprėpiantis mokslas. Ji iš esmės paaiškina ir žvaigždžių raidą, ir planetų judėjimą, ir elementariųjų dalelių prigimtį. Fizika įgalina mus keisti aplinką – statyti tiltus, paleisti į erdvę kosminius aparatus ar gaminti precizinius mikrochirurgų instrumentus. Ji davė mums internetą; įgalino gaminti stiprią, lengvą sporto įrangą; ji skverbiasi į visas mūsų gyvenimo sritis.

Kiekviename šimtmetyje padaryta atradimų ir įvyko fizikos idėjų raidos pokyčių. Naujos stulbinančios idėjos greitai virsta kasdienybe. Pavyzdžiui, A. Einšteino (*Einstein*) reliatyvumo teorija nustebino pasaulį, ligtol žinojusį tik klasikinę Niutono mechaniką, o dabar Einšteino teoriją traktuojame kaip seką naudingų idėjų, kurios natūraliai atsirado tyrinėjant šviesą ir kūnų judėjimą.

Taigi fiziką galima apibūdinti dviem aspektais. Pirmiausia – tai informacijos apie dėsnius, kurie valdo gamtos pasaulį ir padeda mums suvokti aplinką, visuma. Kita vertus, fizika grindžiama daugelio specialistų – inžinierių, astronomų, elektronikos konstruktorių, medicinos mokslo tyrinėtojų

Fizikinio pasaulio schema



Vietovės schema padeda keliautojui iš anksto įsivaizduoti kelionę ir sėkmingai įveikti pasirinktą maršrutą. Žinoma, tą patį tikslą galima pasiekti naudojantis skirtingomis schemomis. Fizikoje taip pat: ši schema yra tik vienas iš galimų būdų jūsų veikloje pasinaudoti fizikos informacija. Pateiktoji schema atspindi ir šios knygos planą. Taigi ji turėtų padėti jums rasti orientyrus studijų kelyje.

Šioje schemoje mes padalijome pasaulį į **gamtinį** ir **žmogaus sukurtą.** Akivaizdu, kad šie du pasauliai persikloja ir sąveikauja: pavyzdžiui, energijai gauti sudegintas kuras daro poveikį atmosferai ir galų gale keičia klimatą Žemėje. **Visuotiniai principai** – fizikų sukurtos koncepcijos ir atrasti dėsniai – galioja ir gamtiniame, ir žmogaus sukurtame pasaulyje.

veiklos sričių; fizikos idėjomis remiasi verslo vadybininkai ir kiti, nes ji įgalina keisti ir kurti materialųjį pasaulį pagal savo poreikius ir įgyvendinti siekimą atrasti nauja.

Fizikos kūrimas

Fizika prasideda nuo **reiškinių** – to, kas vyksta, ką mes stebime. Fizikai stengiasi paaiškinti šių reiškinių prasmę kurdami **koncepcijas** – sąvokų ir dydžių tarpusavio sąveikos modelius, tarkime, jėgos ir energijos **dėsnius** ir, pavyzdžiui, Faradėjaus elektromagnetinės indukcijos dėsnį.

Mokydamiesi fizikos jūs pastebėsite vieną iš svarbiausių šio mokslo ypatumų – siekimą sukurti **modelį.** Modelis surikiuoja reiškinius, sąvokas ir teoriją į prasmingą visumą. Juo remdamiesi mokslininkai gali kelti **hipotezes** ir kurti realius **praktinius prietaisus,** kurie iš tikrųjų veikia. Pavyzdžiui, banginis šviesos modelis paaiškina mums, kodėl plona alyvos plėvelė atrodo taip spalvingai. Jis taip pat padėjo astronomams patobulinti teleskopus. Banginį šviesos modelį sugretinus su krūvio bei srovės modeliais buvo prieita prie radijo bangų teorijos, išsirutuliojusios iki radijo ir televizijos.

Modelis nebūtinai turi būti išbaigtas ir nebūtinai teisingas. Siekiant geriau suprasti šviesą, taip pat atomus ir elektronus, banginį šviesos modelį XX a. teko išplėsti, kad būtų atsižvelgta į dalelių savybes. O tada prieita ir prie lazerių idėjos.

Priemonės

Jei siekiate įvaldyti moderniąją fiziką, jums reikalingos priemonės reiškiniams ir modeliams tirti. Ypač naudingų priemonių fizikos plėtrai teikia **matematika.** Taip pat sukurta daug prietaisų, skirtų darbui laboratorijose: tai matuokliai, osciloskopai, maitinimo šaltiniai, duomenų kaupikliai.

Įgūdžiai

Matematikai taikyti reikalingos ne tik žinios, bet ir įgūdžiai – gebėjimas pasirinkti tinkamus metodus. Sėkmingam mokymuisi bei veiklai reikia ir daugiau įgūdžių. Jie yra tokie:

- **manipuliaciniai** įgūdžiai – saugiai ir tinkamai naudotis laboratoriniais prietaisais;
- **tyrimo** įgūdžiai – planuoti, atlikti eksperimentus, analizuoti ir vertinti jų rezultatus;
- **informacijos gavimo** įgūdžiai – gauti informacijos iš įvairių šaltinių: knygų, žurnalų, taip pat iš pašnekovų ir mokytojų;
- **informacijos technologijų** (IT) įgūdžiai – kaupti, klasifikuoti, analizuoti ir pateikti duomenis naudojantis kompiuteriais ir kitomis elektroninėmis sistemomis;
- **bendravimo** įgūdžiai – mokėjimas bendrauti su kitais žmonėmis raštu bei žodžiu, taip pat gebėjimas našiai dirbti vienoje komandoje.

Kaip naudotis šia knyga

Esminės fizikos koncepcijos išdėstytos šios knygos 2–19 skyriuose. Juose aprašomi ir aiškinami fizikos klausimai, reikalingi fizikos **pamatams** padėti. Kitus skyrius jūs nagrinėsite suderinę su pasirinkta studijų programa.

Kiekvienas skyrius prasideda **Įvadu,** kuriame pateikiamas koks nors konkretus pavyzdys, būdingas tame skyriuje aprašomam dalykui.

Trumpoje apžvalgoje aptariami tame skyriuje dėstomi fizikos klausimai. Raktažodžiai ir sąvokos atspausdintos **pusjuodžiu** šriftu.

2 Judėjimas erdvėje ir laike

GAISRININKŲ, POLICIJOS ir greitosios pagalbos tarnybos privalo teikti skubią pagalbą, todėl joms dažnai tenka kiek galima greičiau važiuoti į įvykio vietą esant intensyviam eismui. Gyvenvietėse greitoji pagalba turi per 8 min. atvykti į 50% ir per 14 min. – į 95% iškvietimo vietų.

Vidurio Vakarų Amerikoje greitoji pagalba gauna 850 iškvietimų per parą, ir labai svarbu, kad pagal iškvietimą išvyktų artimiausias iš 64 jos ekipažų. Jiems padeda palydovinė tikslo nustatymo ir maršruto sekimo sistema, kuri čia pirmą kartą pasaulyje buvo panaudota greitosios pagalbos tarnybai.

Kiekviename greitosios pagalbos automobilyje įmontuota imtuvo ir kompiuterio sistema, kuri nuolatos apdoroja radijo signalus, gaunamus iš stacionaria orbita aplink Žemę skriejančio palydovo. Signalai keleto metrų tikslumu nustato, kur tuo metu yra automobilis, ir ši informacija radijo bangomis perduodama į dispečerinį centrą. Čia realiu laiku fiksuojanti žemėlapyje sistema nenutrūkstamai rodo ekrane greitosios pagalbos automobilių maršrutus, o gavus iškvietimą, pažymi jo vietą. Tada centro dispečeriai gali į įvykio vietą pasiųsti artimiausią ekipažą ir parinkti jam optimalų maršrutą.

Įžanga

Judėjimas yra viena svarbiausių temų studijuojant fiziką, o šios srities žinių taikymas yra itin svarbus kasdieniniame gyvenime. Pavyzdžiui, ... valdyti transporto priemones, ...

Trianguliacija

Žemėlapiams sudaryti dabar naudojamas topografinis metodas, vadinamas **trianguliacija.** Ji atliekama ant žemės arba naudojantis topografiniais palydovais. Metodas pagrįstas ...

Teminiai straipsniai aprašo šiuolaikinius mokslo taikymus arba istorinę raidą.

PALYDOVAI TOPOGRAFIJOS TARNYBOJE

NAUDOJANTIS ŽEMĖS PALYDOVAIS dabar sudarinėjami didesnių nei keleto kvadratinių kilometrų sritis apimantys žemėlapiai. Pirmas klausimas žemėlapio sudarinėtojui: kokios jo tikslios koordinatės? Kad tiksliai nustatytų padėtį, topografinis įrenginys turi susisiekti bent su keturiais palydovais (2.8 ir 2.9 pav.). Trys reikalingi padėčiai fiksuoti, o ketvirtuoju papildomai patikrinama.

Kad būtų galima jais pasinaudoti, reikia labai tiksliai žinoti pačių palydovų koordinates. Todėl jie yra nuolat stebimi iš Žemėje įrengtų stočių, kurių padėtys taip pat žinomos. Iš palydovų siunčiami aukšto dažnio radijo signalai. Kiekvieno palydovo tiksli padėtis nustatoma pagal nuo jo atsispindėjusio impulso sklidimo trukmę.

Atmosferoje kartkartėmis atsirandantys jonizuoti sluoksniai šiek tiek keičia radijo bangų sklidimo greitį. Kartografavimo duomenys tikslinami atsižvelgiant į palydovų greičio pokyčius.

Pasaulinės pozicionavimo sistemos 1994 m. veikė 2 metrų tikslumu; tikimasi per keletą artimiausių metų tikslumą dar padidinti iki 10 centimetrų.

GPS palydovai
A
B
C
D
Kartografavimo laivas
Stebėjimo stotis

Išplėstiniuose intarpuose, pateiktuose spalvotame fone, sąvokos aiškinamos nuodugniau.

Žr. 12 ir 13 klausimus. te horizontalia kryptimi nueitą kelią.

Kampu į horizontą mesto kūno formulė

Kaip parodyta, vertikalioji greičio dedamoji yra lygi $v\sin\theta$, o horizontalioji lygi $v\cos\theta$.

$v_y = v \sin\theta$
Greitis v
θ
$v_{hor} = v\cos\theta$

3.17 pav. **Horizontalioji ir vertikalioji greičio dedamosios**

Lėkio trukmė

Lėkio trukmė T yra dvigubai ilgesnė nei kilimo trukmė t. Iš pagrindinės kinematikos lygties ($v = at$) gauname:

$$t = \frac{v\sin\theta}{g}, \text{ iš kur } T = \frac{2v\sin\theta}{g}$$

Aukštis

Kūnas pasiekia aukštį h. Jį nesunku rasti iš lygties, siejančios vertikalųjį greitį su keliu, nueitu kol kylama aukštyn:

$$v_1^2 - v_0^2 = 2gh$$

Šiuo atveju v_1 yra lygus nuliui, o v_0 iš tiesų yra $v\sin\theta$. Todėl:

$$v^2\sin^2\theta = 2gh \text{ arba } h = \frac{v^2}{2g}\sin^2\theta$$

Maksimalus nuotolis

Kūnas nuskrieja maksimalų atstumą, kai jis metamas $\theta = 45°$ kampu. Įrodykime.

Pirmiausia pasinaudokime trigonometrine formule:

$$2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$$

Įrašę tai į anksčiau pateiktą formulę, aprašančią lėkio nuotolį R, gausime:

$$R = \frac{v^2}{g}\sin 2\theta$$

Kaip įvertinti mokymosi pažangą

Kiekvieno skyriaus pabaigoje yra **Santrauka;** joje trumpai apibendrinami pagrindiniai dalykai, kuriuos turėjote suprasti ir išmokti perskaitę tą skyrių.

2 Judėjimas erdvėje ir laike ■ 25

SANTRAUKA

Šiame skyriuje pateikti aiškinimai padės jums suprasti kai kurias sąvokas ir įgauti skaičiavimo įgūdžių. Tikimės, kad jį perskaitę jūs

- Suprasite, kad atstumas gali būti matuojamas ne tik ilgio vienetais, kaip metras ar kilometras, bet ir laiko vienetais (sekundėmis).
- Sužinosite, kad atstumo matavimai iš esmės remiasi šviesos greičiu c.
- Sužinosite, kad judėjimo matavimo rezultatai priklauso nuo pasirinktos atskaitos sistemos.
- Išnagrinėsite nueito kelio ir greičio priklausomybių nuo laiko grafikus.
- Išmoksite naudotis judėjimo lygtimis, aprašančiomis pastoviu pagreičiu tiesiai judančių kūnų judėjimą.
- Imsite skirti vektorinius ir skaliarinius dydžius.
- Nagrinėdami vektoriais aprašomą judėjimą naudositės vektorinėmis diagramomis arba/ir išmoksite atlikti trigonometrinius skaičiavimus.
- Suprasite trianguliacijos pagrindus.

Jums reikėtų įsiminti šias **judėjimo lygtis:**

- **Judėjimo pastoviu greičiu** (arba vidutiniu greičiu):
  kelias = (vidutinis) greitis × laikas
  $x = vt$
- Esant **pastoviam (stacionariam) pagreičiui:**

a) $\text{pagreitis} = \dfrac{\text{greičio pokytis}}{\text{laikas, per kurį jis įvyko}}$

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t} \text{ arba } a = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

arba paprasčiau: $v_1 = v_0 + at$.

b) nueitas kelias = vidutinis greitis × laikas

$$x = \frac{v_1 + v_0}{2}t,$$

arba: $x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$

Kai t nežinomas, naudojame lygtį

$$v_1^2 - v_0^2 = 2ax$$

c) Esant netolyginiam judėjimui, reikia imti mažus pokyčius:

$\Delta x = v\Delta t$, arba diferencialine išraiška $v = \dfrac{dx}{dt}$

$\Delta v = a\Delta t$, arba diferencialine išraiška $a = \dfrac{dv}{dt}$

KLAUSIMAI

1 Lėktuvo modelį galima valdyti „realiame laike" navigacijos tarnybos radijo siųstuvo vairalazde. Kodėl tokia valdymo sistema netinka kosminiam zondui, skriejančiam pro Jupiterį, valdyti? (Tarkim, kad abiem atvejais signalo priėmimo kokybė yra tokia pati.)

2 Apskaičiuokite:

a) Lėktuvo atstumą (kilometrais) nuo oro uosto, kurio radaras rodo, kad šis atstumas laiko vienetais yra 1,67 ms.

b) Laiką, per kurį radijo pranešimas iš Žemės pasieks Marsą, kai jie nutolę minimaliu atstumu, lygiu $7{,}83 \times 10^7$ km.

3

a) Vertikaliai veikiantis kartografavimui naudojamo palydovo radaras zonduoja iš pradžių jūros paviršių, po to pakrantės uolą. Jis užfiksuoja, kad signalo sklidimo trukmė pakinta 1,17 mikrosekundžių. Įrodykite, kad uola yra 175 m aukščio.

b) Kokiu tikslumu turi būti fiksuojamas laikas palydove, iš kurio matuojami 0,3 m aukščių skirtumai?

4 Astronomai atstumui iki artimiausių žvaigždžių išmatuoti naudojasi bazine atkarpa (ją atitinka atkarpa AM 2.K6 paveiksle), kuri lygi 499 šviessekundėms, t. y. Žemės sukimosi aplink Saulę spinduliui. Išmatuotas kampas, atitinkantis kampą ACB, vadinamas žvaigždės *paralaksu*.
Paralaksų kampai dviem žvaigždėms pateikti lentelėje. Apskaičiuokite atstumą nuo Žemės šviesmečiais.

Žvaigždė	Paralaksas (°)
Sirijus	$1{,}05 \times 10^{4}$
Kentauro alfa	$2{,}07 \times 10^{4}$

5 Radarinis greičio matuoklis, skirtas lėktuvo greičiui nustatyti, rodo 8 kHz dažnio pokytį. Radaro darbinis dažnis yra 10^{10} Hz. Koks lėktuvo greitis matuoklio atžvilgiu?

Paraštėse yra **Kontroliniai klausimai,** skirti pasitikrinti, ar gerai suvokėte tai, ką perskaitėte.

K Dviratininkas nemindamas pedalų leidžiasi nuo kalno su 2,5 m · s^{-2} pagreičiu.

a) Per kiek laiko dviratininko greitis padidės nuo 5 m · s^{-1} iki 20 m · s^{-1}?

b) Įrodykite, kad dviratininkas per tą laiką nuvažiuos apie 75 m.

c) Ar būtų racionalu taik...

2.17 pav. **Tolygiai lėtėjančio judėjimo grafi... nuspalvintos srities plotas atitinka 100 m ...**

2.17 paveiksle pavaizduota priklau... jantį kūno judėjimą iki jis sustoja. ... plotas rodo nueitą kelią. Judėjimo ly... kreipti dėmesį į *ženklus*. Į formul... mas teigiamas ar neig... lygus ...

Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikta daugiau **Klausimų.** Kai kurie klausimai labai paprasti, skirti patikrinti, ar suvokėte pagrindines sąvokas; kiti nuodugnesni – į juos atsakysite giliau suvokę dalyką. Tai – klausimai, kurie galėtų būti pateikti egzaminų metu. Dažnai pateikiami „didaktiniai" klausimai, į kuriuos atsakysite įrodę formules ar pažvelgę į sąvokas kitaip nei pateikta tekste.

Klausimai yra susieti su skyriuje nagrinėjama medžiaga **Pastabomis paraštėse** atitinkamose teksto vietose.

Žr. 12 ir 13 klausimus.

- Tada įrašę t ir horizontaliosios grei... te horizontalia kryptimi nu...

Daugumoje skyrių pateikiamos **Užduotys.** Tai dažniausiai papildoma užduotis, kurioje reikia išnagrinėti fizikos taikymo pavyzdį su konkrečiais duomenimis. Vienos užduotys lengvesnės, kitoms atlikti reikės daugiau pastangų, pasitelkus daugiau pateiktos informacijos.

28 ■ 2 Judėjimas erdvėje ir laike

Užduotis

JUDĖJIMO NAGRINĖJIMAS NAUDOJANTIS DINAMINE DUOMENŲ LENTELE

Daugelyje fizikinių situacijų dinaminėmis duomenų lentelėmis galima pasinaudoti norint atsakyti į klausimus: „Kas įvyks, jeigu?" Su jomis galima atlikti gana sudėtingus matematinius veiksmus. Tai naudinga norint patikrinti, kas atsitiks pakeitus vieną faktorių kitu; jas naudojant išvengiama daugybės pasikartojančių vienodų skaičiavimų ir (arba) naujų grafikų braižymo.

Aptarsime taikymą, kuris padės jums įgyti ar patobulinti naudingą tyrimo priemonę, taip pat įsigilinti į fiziką. Tam nereikia įrodinėti kokias nors matematines (analitines) formules – tiesiog panaudosime paprasčiausius **greičio** (t. y. judėjimo spartos tam tikra kryptimi) ir **pagreičio** apibrėžimus.

Skirtingų kompiuterinių programų šeimų naudojimosi duomenų lentelėmis detalės šiek tiek skirtingos. Jei čia pateiktos instrukcijos netinka ar neturi prasmės, paprašykite padėti geriau susipažinusio su konkrečia programa draugo.

Atkreipkite dėmesį, kad šioje Užduotyje kintamųjų žymenys pateikiami ne kaip įprasta – t. y. kursyvu išskirtomis raidėmis, o taip, kaip jie pateikti lentelėje. Mažas dydžio pokytis, paprastai žymimas Δ, čia pažymėtas D.

Pasiruošimas skaičiavimams

Atidarykite duomenų lentelės puslapį.

Stenkitės viską išdėstyti taip, kaip pavaizduota 2.U1 pav. Pradėkite nuo antraščių. Pradėkite ląstelėje A1 ir surinkite užrašą

GREITĖJANTIS JUDĖJIMAS

Kaip parodyta 2.U1 pav., antraštei skirtos trys ląstelės. Tiesiog tam, kad gražiau atrodytų, praleiskite keletą tuščių ląstelių, pereikite į ląstelę A4 ir įrašykite:

Pradinis greitis V1 =

2.U1 pav.

A	A	B	C	D
1	GREITĖJANTIS JUDĖJIMAS			
2				
3				
4	Pradinis greitis V1 =		10	m/s
5	Pagreitis a =		8	m/s^2
6	Žingsnis, Dt =		0,1	s
7				
8	Laikas	Greitis	Kelias	
9	0	10	0	
10	0,1	10,8	1,04	
11	0,2	11,6	2,16	
12	0,3	12,4	3,36	
13	0,4	13,2	4,64	
14	0,5	14		

Kiekvienas skyrius ar skyrių grupė baigiasi **Schema,** į kurią įtrauktos pagrindinės to skyriaus sąvokos ir jų tarpusavio sąryšiai. (Būtų dar geriau, jei baigę skaityti skyrių sudarytumėte savo schemą.)

4 Niutono dėsnių taikymas ■ 81

JĖGA IR JUDĖJIMAS NIUTONO VISATOJE

Šia schema apibendrinamos svarbiausios sąvokos, aptartos šiuose skyriuose: **2 Judėjimas erdvėje ir laike, 3 Niutono Visata ir 4 Niutono dėsnių taikymas.** Ji aprėpia pagrindines sąvokas ir lygtis, su kuriomis susipažinote šiuose skyriuose, nurodomi jų tarpusavio saitai ir priklausomybės. Šrifto dydis atspindi sąvokų hierarchiją: stambiausiu šriftu užrašytos pagrindinės sąvokos, smulkesniu – papildomos sąvokos.

Pagal šią schemą jūs galite pasitikrinti, kaip pagrindinės šioje knygoje aptartos temos atitinka tai, ką jūs turite žinoti ir suprasti pagal savo mokymosi programą.

Peržiūrėję schemą išsiaiškinsite, kurias sąvokas ir matematinius metodus tvirtai žinote. Taip pat sužinosite, kurias sąvokas dar turėtumete pastudijuoti, taip pat tokias, kurias nuodugniau pasiaiškinę lengviau galėtumėte suvokti silpniau įsisavintas sritis.

Nuorodos ir pakartojimai

Viename skyriuje pateiktos sąvokos dažnai susijusios su kita tema, todėl tekste pažymėtos nuorodos į atitinkamus puslapius. Tačiau kartais tikslingiau pakartoti trumpus apibrėžimus, ir tokie **Pakartojimai** knygoje pateikti varnele paženklintose paraščių srityse.

2 Judėjimas erdvėje ir laike ■ 13

EITIS IR PAGREITIS

...i, šviesa ir radijo bangos, ga... ...t ir *greičiui* nustatyti. Polici... ...orto priemonės greitis ma... . Šio efekto esmė tokia.

...uris juda šaltinio atžvil... objekto atsispindėju... ...uo šaltinio signalo.

...o signalo šaltinio. Ta... ...inio įkandin, turi nu... ...d jį pavytų. Atsispin... ...io, negu ...ios

Bangos dažnis rodo, kiek kartų per sekundę pasikartoja būdingas bangos pavidalas. **Bangos ilgis** – tai atstumas tarp artimiausių taškų, kurių fazės (nuokrypiai nuo pusiausvyros padėties) vienodos. Bangos **greitis** susijęs su dažniu ir bangos ilgiu:

bangos greitis = dažnis × bangos ilgis

Matematika

Šios knygos skaitytojui reikalingi matematikos pagrindai, tačiau jam nebūtina mokytis matematiką sustiprintu lygiu. Kitaip sakant, aiškinimai grindžiami nesudėtingomis matematikos formulėmis. Kad būtų lengviau nagrinėti, pateikti **Pavyzdžiai.** 2-ame priede pateiktos matematikos žinios, kurių jums prireiks mokantis fizikos sustiprintu lygiu, taip pat ir laikant egzaminą.

2 Judėjimas erdvėje ir laike ■ 9

PAVYZDYS

K Lėktuvų skrydžių dispečeris radariniu tolimačiu išmatuoja, kad radaro impulsas nusklinda iki lėktuvo ir grįžta atgal per 0,48 ms (0,00048 s). Kokiu atstumu (m) nutolęs šis lėktuvas?

A Tarkime, radaro impulsas ir pirmyn, ir atgal sklinda tokį pat laiką. Tuomet lėktuvas turi būti nutolęs per 0,24 šviesos milisekundės.

Atstumas metrais = c × šviesos sklidimo trukmė
$= 2{,}99792458 \times 10^8 \times 0{,}24 \times 10^{-3}$
$= 7{,}2 \times 10^4$ m

Atkreipkite dėmesį, kad šio matavimo tikslumas – tik du reikšminiai skaitmenys. Praktikoje naudojami kur kas tikslesni radariniai tolimačiai. Tačiau spręsdami daugumą šioje knygoje pateiktų pratimų galite pakankamu tikslumu pasirinkti c vertę $3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1}.

2.5 pav. **Radarinė lokacija: lėktuvų skrydžių kontrolės įtaisai išmatuoja radaro impulso sklidimo į abi puses trukmę ir paverčia ją kilometrais**

Čia panaudota žinoma formulė:

Kelias = greitis × laikas

$x = v \times t$

■ Žr. 2 ir 3 klausimus.

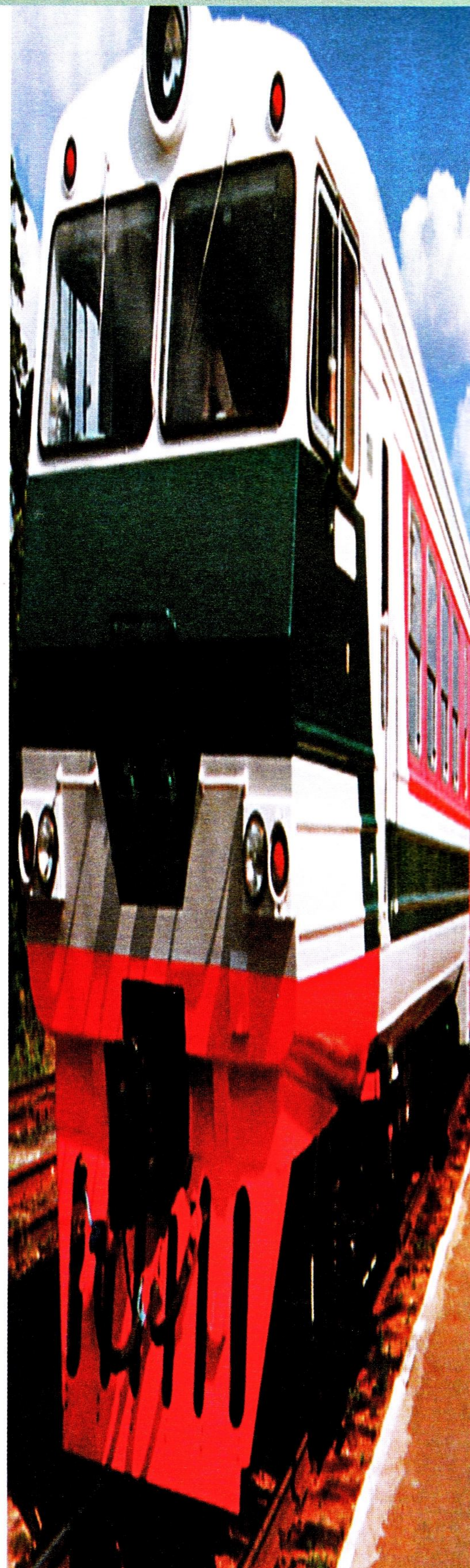
Stebėdamas už dešimčių kilometrų esančio lėktuvo skrydį dispe...

B Jei nustatote savo laikrodį pagal...

Praktinis darbas ir tyrimai

Ši knyga nėra praktinė: eksperimentai joje paminimi, bet išsamiai neaprašinėjami. Tačiau 3-iame priede yra pateikti patarimai praktiniam ir tiriamajam darbui, taip pat kitokioms mokymosi formoms. Priede nurodyti svarbiausi eksperimentai, kurie paprastai sudaro dalį sustiprinto kurso; taip pat pateiktos idėjos tyrimams, kuriuos galėtumėte atlikti.

JĖGOS, JUDĖJIMAS IR MEDŽIAGOS



ŠIAME SKYRIUJE rašoma apie įprastinių objektų fiziką. Nagrinėsime jėgas, kurios verčia kūnus judėti, deformuotis ar lūžti, taip pat kaip tie kūnai priešinasi šiems poveikiams. Tokius reiškinius aprašančios sąvokos pagrįstos teorijomis ir dėsniais, kuriuos XVII a. pirmasis nustatė seras Izaokas Niutonas (*Isaac Newton*). Savo dėsnius jis suformulavo taip tiksliai, kad mes iki šiol naudojamės jo apibrėžimais, aprašančiais ir numatančiais judėjimą visko – pradedant dujų molekulėmis ir baigiant kosminiais aparatais.

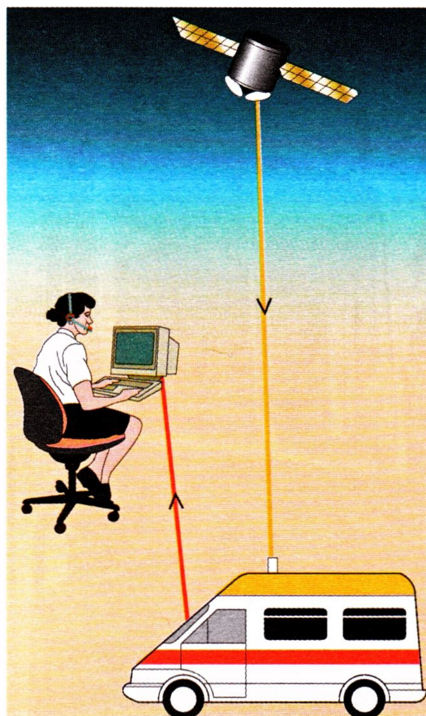
Mūsų aplinkos kūnai sudaryti iš elementarių medžiagų. „Elementariomis medžiagomis" čia laikome atomus ir molekules, susijungusius į visumą – dujas, skysčius ar kietuosius kūnus. (Kai kuriuose skyriuose susidursime su pirmine materija, kuri paklūsta kitiems, kvantiniams dėsniams.)

Nagrinėdami paprasčiausių medžiagų darinius, aptarsime gamtoje sutinkamus objektus: dujas, kristalus ar metalus. Taip pat išsiaiškinsime, kaip nuo jų savybių bei reakcijos į išorinį poveikį priklauso, ką pasirinksime iš jų gaminti, pavyzdžiui – pastatus ar transporto priemones.

Taip pat panagrinėsime vieną tokią fundamentalią sąvoką, kuri Niutono laikais dar buvo nežinoma – energijos sąvoką. Ji nagrinėjama daugelyje šios knygos skyrių, taigi yra pakankamai svarbi, ir būtina ją aptarti atskirai. Jėgos ir energijos sąvokos glaudžiai susijusios su labai svarbia lauko koncepcija, įvedama aptariant gravitacinius laukus.

Daugelį šioje dalyje pateiktų sąvokų sutiksite ir vėliau – taigi verta jas nuodugniai išsiaiškinti.

2 Judėjimas erdvėje ir laike



GAISRININKŲ, POLICIJOS ir greitosios pagalbos tarnybos privalo teikti skubią pagalbą, todėl joms dažnai tenka kiek galima greičiau važiuoti į įvykio vietą esant intensyviam eismui. Gyvenvietėse greitoji pagalba turi per 8 min. atvykti į 50% ir per 14 min. – į 95% iškvietimo vietų.

Vidurio Vakarų Amerikoje greitoji pagalba gauna 850 iškvietimų per parą, ir labai svarbu, kad pagal iškvietimą išvyktų artimiausias iš 64 jos ekipažų. Jiems padeda palydovinė tikslo nustatymo ir maršruto sekimo sistema, kuri čia pirmą kartą pasaulyje buvo panaudota greitosios pagalbos tarnybai.

Kiekviename greitosios pagalbos automobilyje įmontuota imtuvo ir kompiuterio sistema, kuri nuolatos apdoroja radijo signalus, gaunamus iš stacionaria orbita aplink Žemę skriejančio palydovo. Signalai keleto metrų tikslumu nustato, kur tuo metu yra automobilis, ir ši informacija radijo bangomis perduodama į dispečerinį centrą. Čia realiu laiku fiksuojanti žemėlapyje sistema nenutrūkstamai rodo ekrane greitosios pagalbos automobilių maršrutus, o gavus iškvietimą, pažymi jo vietą. Tada centro dispečeriai gali į įvykio vietą pasiųsti artimiausią ekipažą ir parinkti jam optimalų maršrutą.

Įžanga

Judėjimas yra viena svarbiausių temų studijuojant fiziką, o šios srities žinių taikymas yra itin svarbus kasdieniniame gyvenime. Pavyzdžiui, norėdami saugiai valdyti transporto priemones, vairuotojai ar pilotai turi žinoti, kokiu greičiu juda jų automobiliai, traukiniai ar lėktuvai, tuo tarpu šių priemonių dispečeriams informacija reikalinga tam, kad galėtų sudaryti eismo grafikus.

Mikropasaulyje žinios apie dalelių judėjimą leido paaiškinti kietųjų kūnų, skysčių ir dujų savybes.

Tačiau judėjimas yra labai sudėtingas. Pavyzdžiui, automobilininkas kelionės metu gali tūkstančius kartų keisti judėjimo greitį ir kryptį. Arba dujų dalelės – jos nematomos, taigi ar galime bent įsivaizduoti, kaip pasektume jų judėjimą?

Žmonijos istorijoje judėjimą tiksliau matuoti pradėta tada, kai parūpo nustatyti, kaip juda Saulė, Mėnulis, planetos ir žvaigždės. Tuo metu žmonės manė, kad Žemė yra Visatos centre, o visa kita kažkaip sukasi apie Žemę. Taip pat žmonės tikėjo, kad žvaigždės ir planetos daro įtaką jų gyvenimui ir elgsenai, todėl reikėjo tikslių duomenų, įgalinančių daryti astrologines prognozes.

Įprastų objektų judėjimas tada niekam nerūpėjo – dūmai kyla į viršų, o obuoliai krinta žemėn, ir tai visai natūralu. Be to, greitis anksčiau nebuvo tokia svarbi savybė, kaip kad dabar. Žmonės judėdavo lėtai – pėsčiomis, raiti ar burlaiviais. Laikrodžiai buvo retenybė ir matuoti laiką minučių tikslumu visiškai pakako.

Septynioliktajame amžiuje dauguma gyvenimo aspektų pasikeitė. Pirmiausia, visame pasaulyje smarkiai suaktyvėjo prekyba. Dėl to atsirado poreikis tobulinti navigacijos įgūdžius. Vesti laivą per vandenyną kur kas sudėtingiau, nei plaukti nuo vieno uosto prie kito pernelyg nenutolstant nuo pakrantės. Saulės, planetų ir žvaigždžių padėtys pradėjo vaidinti daug svarbesnį vaidmenį – tai buvo reikalinga orientuotis jūroje, ne tik likimui nuspėti.

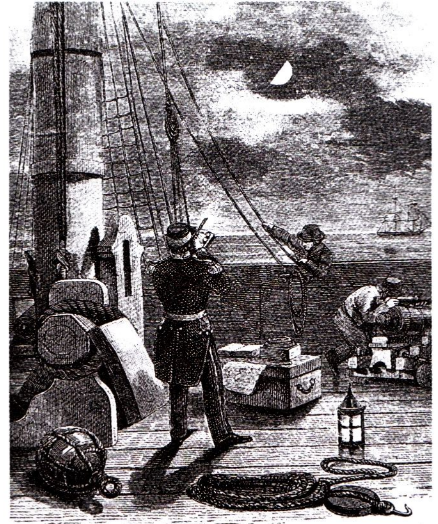
Be to, išradus paraką imta tobulinti karo techniką ir buvo sukurtos patrankos. Italų fizikas Galileo Galilėjus (*Galileo Galiley*, 1564–1642) tyrinėjo judančius kūnus ir išaiškino patrankos sviedinių judėjimo trajektorijas. Tai padėjo suprasti, kaip šaudant iš patrankos pasiekiamas geresnis tikslumas.

Taigi jau XVII a. ištyrinėję judėjimą mokslininkai suvokė, kaip reikia matuoti judėjimą aprašančius dydžius: atstumą, laiką, greitį ir pagreitį.

Paties judėjimo tyrimas vadinamas **kinematika.** Kai atsižvelgiama į judėjimą veikiančias jėgas, šie tyrimai virsta **dinamika.** Daugelio žymiausių pasaulio mokslininkų – pavyzdžiui, Galilėjaus, Niutono ir Einšteino – svarbiausi darbai skirti kūnų judėjimo tyrimams.

Judėjimo tyrimams reikėjo tikslių matavimo prietaisų. Teleskopai, chronometrai ir palydovai jūrinei navigacijai, radarai ir lazeriai apžvalgai – tai tik keletas tokių prietaisų pavyzdžių. Judėjimo tyrimai taip pat vertė fizikus giliau pamąstyti apie erdvę ir laiką bei paskatino sukurti teorijas, aprašančias gravitaciją, specialųjį ir bendrąjį reliatyvumą, Visatos prigimtį ir plėtimąsi. Kai kurias iš šių sudėtingesnių temų aptarsime tolimesniuose skyriuose.

Šiame skyriuje, prieš pradedant nuodugniau tyrinėti kūnų judėjimą, vertėtų apžvelgti, kaip atliekami reikalingi tyrimai, ir kaip buvo apibrėžti matavimo vienetai. Ypač daug dėmesio skirsime šviesai, nes jos naudojimu grindžiama daugelis šiuolaikinių matavimo metodikų, taip pat ji įgalina išmatuoti atstumus, kurie apima platų ruožą nuo mikropasaulio iki Visatos.



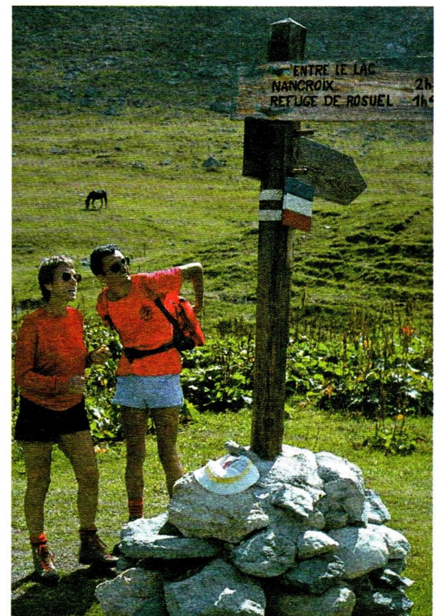
2.1 pav. **Jūrininkai XIX a. naudodavosi sekstantu Mėnulio pakilimo virš horizonto kampui nustatyti. Pagal tą kampą jie apskaičiuodavo laivo geografinę platumą**

1 ATSTUMŲ MATAVIMAS PAGAL LAIKĄ

Judančių kūnų padėtis erdvėje kinta, todėl reikia mokėti išmatuoti *atstumus*. Judėjimas trunka tam tikrą laiką. Taigi reikia išmatuoti ir *laiką*. Praktikoje dažnai svarbiau laikas nei atstumas. Tai iliustruoja kad ir tokie skelbimai:

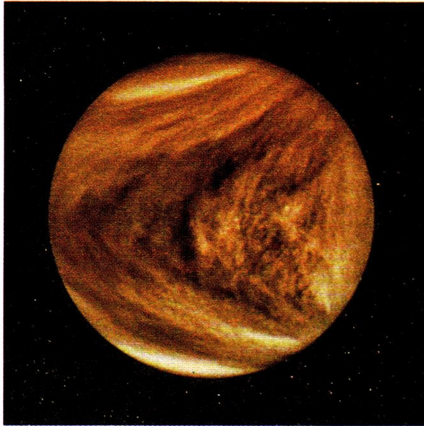
Parduodamas namas. Penkios minutės kelio nuo stoties.
Nuo Paryžiaus iki Londono – tik 40 minučių, skrendant reguliariais oro reisais.

Rodyklės prie pėsčiųjų takų (2.2 pav.) kartais nurodo laiką, per kurį galima pasiekti kokį nors objektą, o ne atstumą iki jo. Aišku, visuose šiuose pavyzdžiuose daromos prielaidos apie judėjimo greitį.



2.2 pav. **Rodyklė informuoja žygeivius, kad iki *Nancroix* yra 2 valandos kelio**

Žodis *laser* (lazeris) yra trumpinys iš ***light amplification** by **stimulated emission** of **radiation*** (šviesos stiprinimas dėl priverstinės spinduliuotės emisijos), o *radar* (radaras) – iš ***radio direction** and **ranging*** (krypties ir atstumo nustatymas naudojantis radijo bangomis).



2.3 pav. **Atstumas nuo Žemės iki Veneros buvo tiksliai nustatytas naudojantis radaru. Tai buvo pirmasis astronominio atstumo matavimas** (žr. 11 psl.)



2.4 pav. **Andromedos galaktika – spiralinė galaktika, artimiausia galaktika mūsų Paukščių Tako galaktikai. Abi jos sudarytos iš begalės žvaigždžių, šaltesnių kūnų, dulkių ir dujų. Pavadinimą gavo pagal žvaigždyną, kuriame ją galima stebėti plika akimi** Žr. 1 klausimą.

A Per kiek laiko šviesa atsklido iki mūsų iš Andromedos galaktikos, kuri atvaizduota 2.4 pav.?

2 ATSTUMŲ MATAVIMAS NAUDOJANTIS ELEKTROMAGNETINĖMIS BANGOMIS

Gali pasirodyti keista, netgi „nemoksliška" matuoti atstumus **laiko vienetais.** Tačiau laiko matavimu grindžiama daug šiuolaikinių atstumo matavimo metodų. Skrydžių valdymo specialistai, norėdami nustatyti lėktuvo padėtį tarp daugelio kitų lėktuvų, matuoja laiką, per kurį radaro impulsai nusklinda iki lėktuvo ir atgal (2.5 pav.). Topografai atstumams tiksliai nustatyti matuoja lazerio šviesos impulso sklidimo trukmę (2.7 pav.). Tiksliems žemėlapiams sudaryti kartografai šiuo metu irgi naudoja radarus (2.8 pav.) arba lazerio spindulį.

Milžiniškiems atstumams Visatos mastu išmatuoti, kad galėtų nustatyti tikslią planetų padėtį, astronomai taip pat naudoja radarus (2.3 pav.). Kaip parodyta 2.1 lentelėje, **laiko vienetais,** pagrįstais **šviesos greičiu** – šviessekundėmis ir šviesmečiais – jie matuoja kur kas didesnius atstumus:

$$\text{laiko vienetas (sekundėmis)} = \frac{\text{atstumas iki objekto (metrais)}}{\text{šviesos greitis (metrais per sekundę)}}$$

2.1 lentelė. **Kai kurie atstumai ilgio ir laiko vienetais**

Objektas	Vidutinis atstumas nuo Žemės metrais	Laiko vienetais
Geostacionarus palydovas	$4{,}2 \times 10^{7}$	0,1401 s
Automobilis nuo greičio kontrolės posto	100	...
Mėnulis	$3{,}844 \times 10^{8}$	...
Saulė	$1{,}496 \times 10^{11}$	...
Sirijus	$8{,}2 \times 10^{16}$	8,7 m.
Andromedos galaktika	$2{,}1 \times 10^{22}$	$2{,}2 \times 10^{6}$ m.

Visos šios metodikos grindžiamos matavimu signalų, kurių sklidimo greitis yra pastovus. Dažnai naudojamasi tuo, kad elektromagnetinės bangos lengvai atsispindi, ypač nuo metalų. Tiek radijo, tiek ir šviesos bangos yra elektromagnetinės bangos, sklindančios pastoviu greičiu (vakuume). Šviesa yra tokia fundamentali ir naudinga matavimo priemonė, kad SI ilgio vienetas **metras** dabar apibrėžiamas naudojantis šviesos greičiu:

Metras yra lygus atstumui, kurį šviesa vakuume nusklinda per 1/299792458 sekundės dalį.

Iš kur tas skaičius 299792458? Tai išsiaiškinsime sužinoję, kad pagal tarptautinį mokslininkų susitarimą metras yra vienas iš septynių pagrindinių matavimo vienetų, o kiti vienetai apibrėžiami remiantis šiais septyniais. (Kitas svarbus pagrindinis vienetas yra sekundė, kuri apibrėžiama naudojantis cezio-133 atomo svyravimais.)

1983 m. buvo patvirtintas naujas metro apibrėžimas: atstumas, kurį šviesa nusklinda per šią labai mažą sekundės dalį, laikomas vienu metru, jei laikome šviesos sklidimo greitį esant 299792458 metrų per sekundę, t. y. tokį, kokiu vakuume sklinda ir visos kitos elektromagnetinės bangos. Šis greitis žymimas simboliu *c*, ir galime užrašyti:

$$\underset{(\mathrm{m})}{\textbf{atstumas}} = \underset{(\mathrm{m \cdot s^{-1}})}{c} \times \underset{(\mathrm{s})}{\textbf{šviesos sklidimo trukmė}}$$

PAVYZDYS

K Lėktuvų skrydžių dispečeris radariniu tolimačiu išmatuoja, kad radaro impulsas nusklinda iki lėktuvo ir grįžta atgal per 0,48 ms (0,00048 s). Kokiu atstumu (m) nutolęs šis lėktuvas?

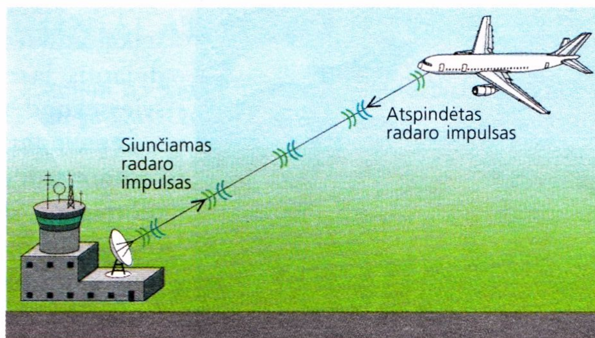
A Tarkime, radaro impulsas ir pirmyn, ir atgal sklinda tokį pat laiką. Tuomet lėktuvas turi būti nutolęs per 0,24 šviesos milisekundes.

Atstumas metrais = $c \times$ šviesos sklidimo trukmė

$= 2{,}99792458 \times 10^8 \times 0{,}24 \times 10^{-3}$

$= 7{,}2 \times 10^4$ m

Atkreipkite dėmesį, kad šio matavimo tikslumas – tik du reikšminiai skaitmenys. Praktikoje naudojami kur kas tikslesni radariniai tolimačiai. Tačiau spręsdami daugumą šioje knygoje pateiktų pratimų galite pakankamu tikslumu pasirinkti c vertę $3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1}.



2.5 pav. **Radarinė lokacija: lėktuvų skrydžių kontrolės įtaisai išmatuoja radaro impulso sklidimo į abi puses trukmę ir paverčia ją kilometrais**

Čia panaudota žinoma formulė:

Kelias = greitis × laikas

$$x = v \times t$$

Žr. 2 ir 3 klausimus.

Stebėdamas už dešimčių kilometrų esančio lėktuvo skrydį dispečeris tiesiogiai naudojasi priklausomybe tarp šviesos ir atstumo – atstumą iki lėktuvo nustato pagal radaro bangų sklidimo trukmę iki lėktuvo ir atgal, kurią tiksliai išmatuoja kvarciniu laikrodžiu.

?

B Jūs nustatote savo laikrodį pagal laiko signalą, perduodamą per radiją. Kiek „vėluos" jūsų laikrodis dėl baigtinio šviesos greičio, jei siųstuvo antena yra už 50 km? Ar jūs pastebėsite paklaidą?

C Nurodykite atstumo matavimo naudojant šviesos spindulį (arba radarą) privalumus ir trūkumus, jei matuojama: **a)** atstumas nuo Žemės iki Mėnulio, **b)** jūsų automobilio kėbulo dažų sluoksnio storis, **c)** kambario plotis.

D Pažvelkite į 2.6 pav. Paaiškinkite, kodėl topografinio žemėlapio sudarymui buvo pasirinkti objektai X ir Y? Kodėl nebuvo pasinaudota bokštu Z?

Šviesos panaudojimas topografijai

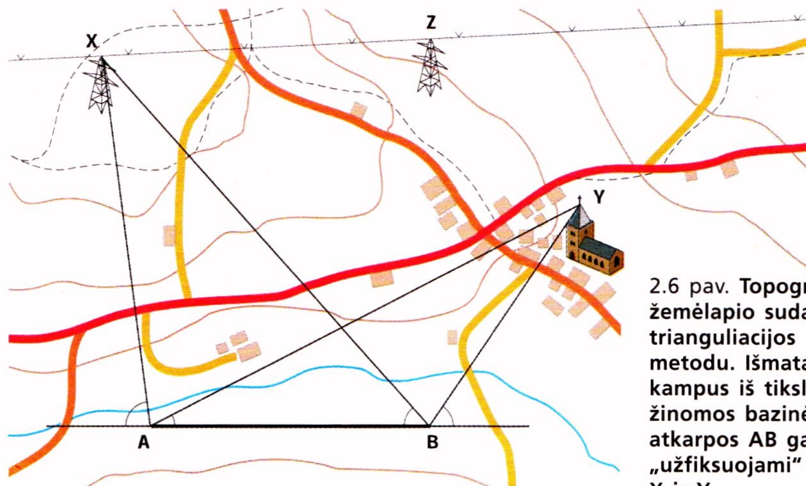
Trianguliacija

Žemėlapiams sudaryti dabar naudojamas topografinis metodas, vadinamas **trianguliacija.** Ji atliekama ant žemės arba naudojantis topografiniais palydovais. Metodas pagrįstas dviem šviesos savybėmis:

- Šviesos spinduliai sklinda tiesiomis linijomis
- Šviesa sklinda žinomu greičiu

Trianguliacijos metodas naudotas, o galbūt ir išrastas, dar Senajame Egipte. Trianguliacijai imama **bazinė atkarpa,** kurios ilgis yra tiksliai išmatuotas (žr. 2.6 pav.). Pasirinkus du tolimus objektus (X ir Y), išmatuojami kampai, kuriais tie objektai matomi iš abiejų

Žr. 6 klausimą.



2.6 pav. **Topografinio žemėlapio sudarymas trianguliacijos metodu. Išmatavus kampus iš tiksliai žinomos bazinės atkarpos AB galų „užfiksuojami" taškai X ir Y**



bazinės atkarpos galų. Tada atstumams tarp objektų nustatyti tereikia atlikti trigonometrinius skaičiavimus. Pastaruoju metu naudojantis lazeriniais tolimačiais (2.7 pav.) atstumai išmatuojami šviessekundėmis ir gautasis rezultatas paverčiamas metrais.

Žemėlapių, sudarytų trianguliacijos metodu, tikslumas priklauso nuo naudojamo laikrodžio tikslumo. Kampus irgi galima išmatuoti gana dideliu tikslumu, tačiau neįmanoma išmatuoti taip tiksliai, kaip šviesos sklidimo trukmės. Tiesa didesnį tikslumą galima gauti parinkus ilgesnę bazinę atkarpą, todėl tiksliems žemėlapiams sudaryti imamos keleto kilometrų ilgio bazinės atkarpos.

2.7 pav. **Matininkai matuoja atstumus lazeriniu prietaisu. Prietaisas skaičiuoja atstumą pagal laiką, per kurį šviesa nusklinda iki objekto ir atgal**

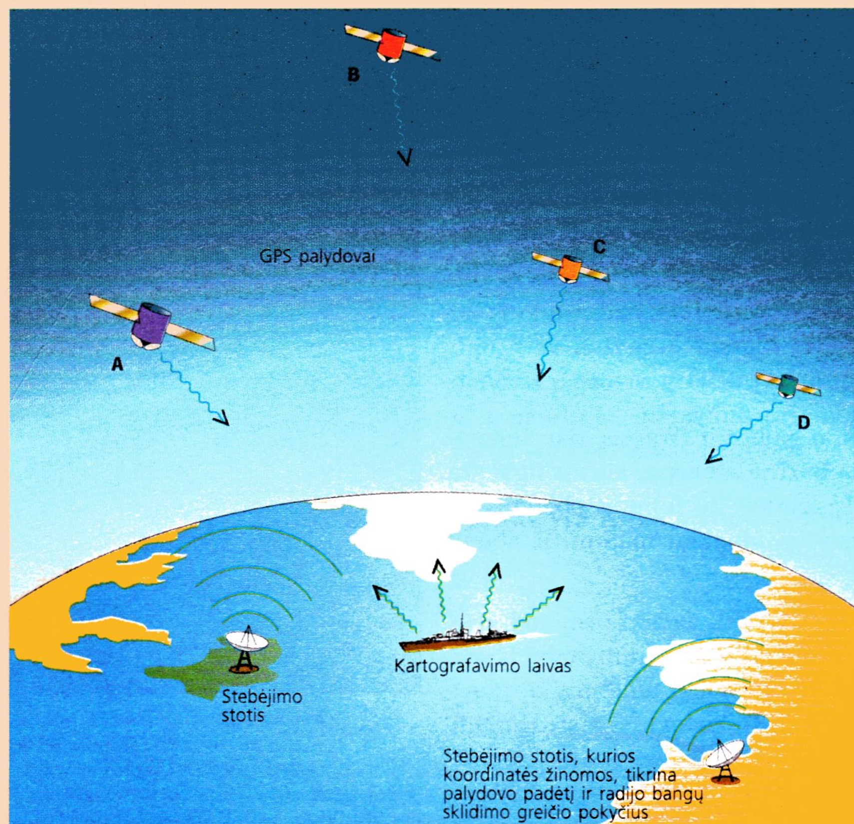
PALYDOVAI TOPOGRAFIJOS TARNYBOJE

NAUDOJANTIS ŽEMĖS PALYDOVAIS dabar sudarinėjami didesnių nei keleto kvadratinių kilometrų sritis apimantys žemėlapiai. Pirmas klausimas žemėlapio sudarinėtojui: kokios jo tikslios koordinatės? Kad tiksliai nustatytų padėtį, topografinis įrenginys turi susisiekti bent su keturiais palydovais (2.8 ir 2.9 pav.). Trys reikalingi padėčiai fiksuoti, o ketvirtuoju papildomai patikrinama.

Kad būtų galima jais pasinaudoti, reikia labai tiksliai žinoti pačių palydovų koordinates. Todėl jie yra nuolat stebimi iš Žemėje įrengtų stočių, kurių padėtys taip pat žinomos. Iš palydovų siunčiami aukšto dažnio radijo signalai. Kiekvieno palydovo tiksli padėtis nustatoma pagal nuo jo atsispindėjusio impulso sklidimo trukmę.

Atmosferoje kartkartėmis atsirandantys jonizuoti sluoksniai šiek tiek keičia radijo bangų sklidimo greitį. Kartografavimo duomenys tikslinami atsižvelgiant į palydovų greičio pokyčius.

Pasaulinės pozicionavimo sistemos 1994 m. veikė 2 metrų tikslumu; tikimasi per keletą artimiausių metų tikslumą dar padidinti iki 10 centimetrų.



2.8 pav. **Žemėlapių sudarinėtojas kartografuoja iš laivo, o laivo tiksli padėtis nustatoma naudojantis duomenimis, gaunamais iš keturių palydovų**



2.9 pav. **Pirmojo palydovo A signalas ir B, C ir D signalai fiksuojami skirtingais momentais, nes jų sklidimo atstumai skirtingi**

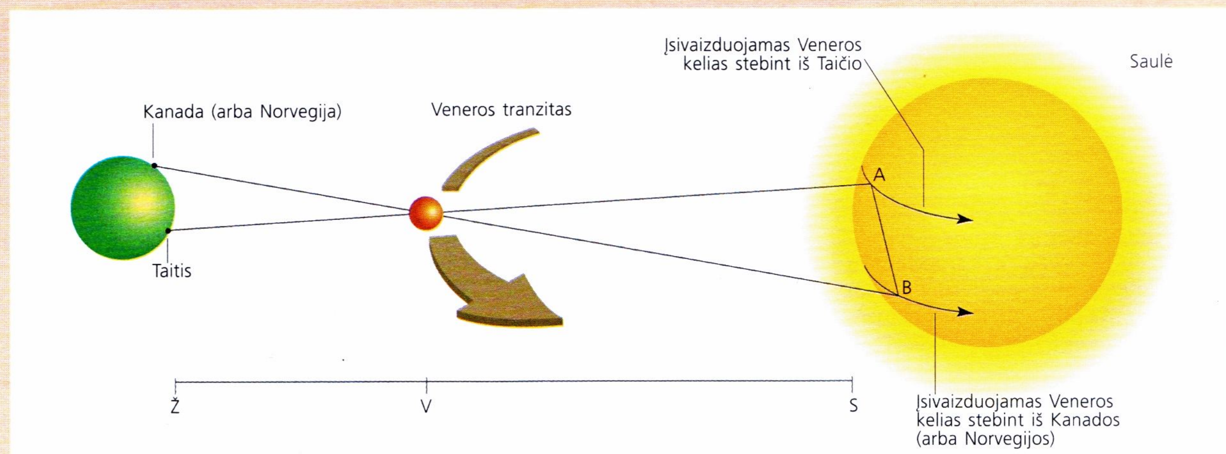
ŠVIESA IR ASTRONOMINIAI ATSTUMAI

KAPITONAS KUKAS PELNĖ gerą vardą kaip žymus jūrininkas ir kruopštus tikslių jūrlapių sudarinėtojas. 1768 m. Britų admiralitetas pasiuntė jį kelionėn į pasaulio kraštą vykdyti grandiozinį projektą – išmatuoti Saulės sistemos matmenis.

Tada jau buvo aišku, kad yra pernelyg sudėtinga išmatuoti atstumą iki Saulės ir planetų remiantis paralaksu, t. y. matuojant šių objektų tarpusavio padėtis danguje iš skirtingų vietų Žemėje. Kampus reikėjo matuoti labai tiksliai ir skirtingose vietose stebėjimus reikėjo atlikti tiksliai tuo pat metu. Be patikimų, tikslių laikrodžių tai buvo neįmanoma.

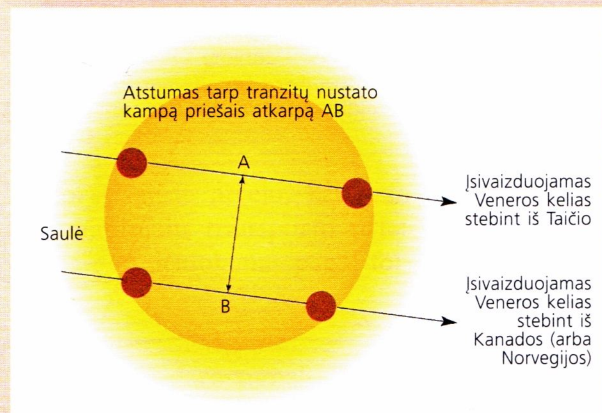
Edmundas Halis (*Halley*), įamžinęs savo vardą Halio kometa, pasiūlė kitą metodą: iš skirtingų vietų Žemėje stebėti ir matuoti laiką, per kurį Venera praslenka Saulės disku. Veneros judėjimas Saulės fone yra retas astronominis įvykis, jis buvo prognozuotas 1761 ir 1769 metais ir daugiau tokio įvykio nebuvo numatyta iki pat 1874 m. 1761 m. atliktų stebėjimų duomenų nepakako atstumui iki Saulės nustatyti. Juo svarbiau buvo nepraleisti progos 1769 m. Buvo surengtos stebėtojų ekspedicijos į šiaurę – Kanadą bei Norvegiją ir į Taitį Pietų jūrose. Kaip tik ten ir vyko kapitonas Kukas.

Santykiniai atstumai nuo Žemės iki planetų ir Saulės tuo metu jau buvo gerai žinomi (2.10 pav.), bet Saulės sistemos mastas dar nebuvo įvertintas. Taigi Veneros tranzitas buvo stebimas iš dviejų Žemės paviršiuje pasirinktų šiaurės–pietų kryptimi žinomu atstumu nutolusių vietų. Matuodami laiką, per kurį Venera įveikė atstumą nuo Saulės disko vieno krašto iki kito, stebėtojai tam tikru tikslumu galėjo nustatyti Veneros nueitą kelią Saulės disko ribose, kaip parodyta 2.11 pav. Tada jie galėjo nustatyti atstumą AB, skiriantį šiuos kelius, taip pat priešais jį esantį kampą. Žinodami šį kampą, jie apskaičiavo atstumą nuo Žemės iki Saulės. Tada jau buvo nesunku apskaičiuoti atstumus iki visų kitų Saulės sistemos planetų, o tai buvo didžiulis pasiekimas.



2.10 pav. **Veneros tranzito stebėjimai, atlikti 1769 m. Atstumų nuo Žemės iki Saulės (ŽS) ir Veneros (ŽV) *santykis*, taip pat atstumas tarp platumų Kanadoje ir Taityje buvo žinomi**

2.11 pav. **Stebėtojai išmatavo kampą priešais atkarpą AB ir apskaičiavo atstumą iki Saulės**



Astronominis vienetas

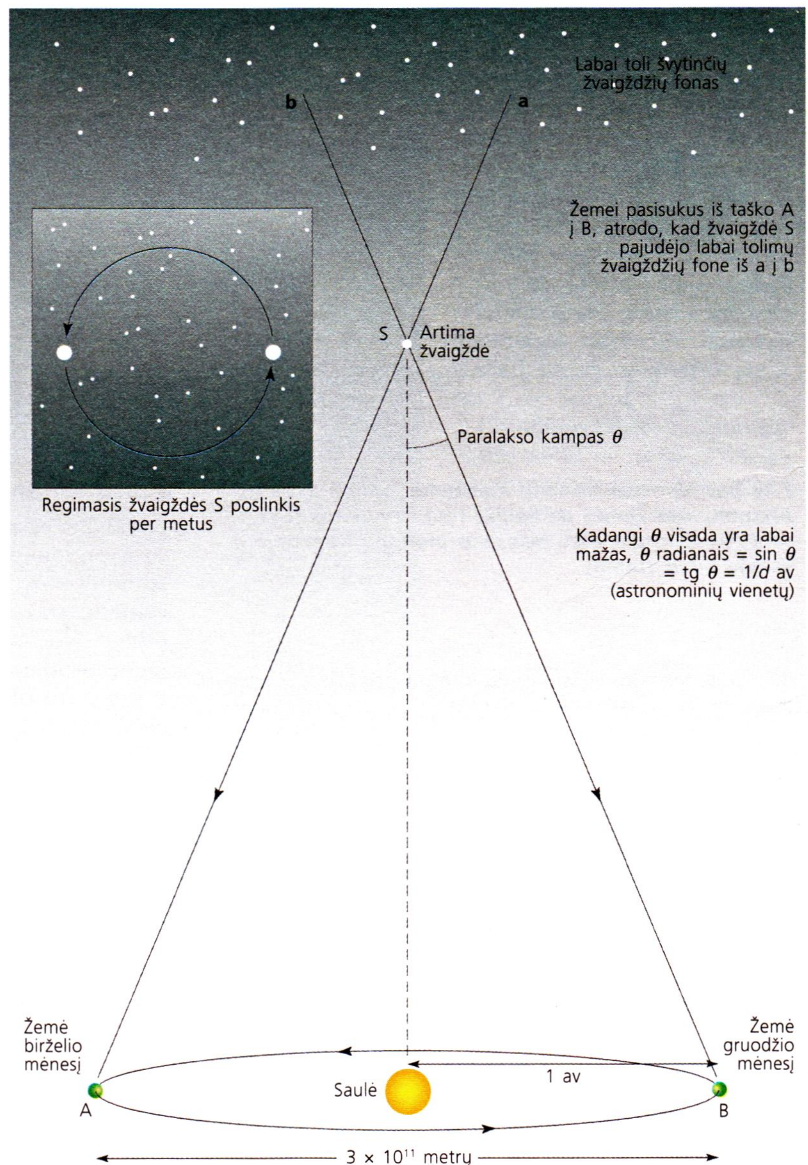
Aprašytas eksperimentas įgalino apibrėžti atkarpą visų astronominių atstumų matavimui – Žemės orbitos spindulį. Šis atstumas yra vadinamas astronominiu vienetu, sutrumpintai av. Jis lygus $1{,}496 \times 10^{11}$ m (499,0 šviessekundžių). Džiugu pastebėti, kad 1769 metų rezultatas sutampa su šiuolaikine verte maždaug 1 procento tikslumu. (Apie šiuolaikinę šio matavimo versiją skaitykite 2-oje knygos d. – 27 sk.)

Koks atstumas iki žvaigždžių?

Nuotoliai iki žvaigždžių yra tokie dideli, kad neįmanoma jų nustatyti naudojantis bazine atkarpa Žemės paviršiuje. Tačiau astronomai pastebėjo, jog Žemei sukantis aplink Saulę, kai kurios žvaigždės lyg ir pasislenka kitų žvaigždžių atžvilgiu. Jie padarė išvadą, kad šis reiškinys analogiškas tokiam, kokį patiriame judėdami priešais langą: atrodo, kad lango rėmas juda tolimesnių objektų fone. Šis efektas vadinamas **paralaksu;** kalbant apie žvaigždes – žvaigždės paralaksu (žr. 2.12 pav.).

Žr. 4 klausimą.

Devynioliktajame šimtmetyje buvo išmatuoti tūkstančių žvaigždžių paralaksai ir apskaičiuoti atstumai iki jų. Tačiau daugelio žvaigždžių paralakso nepastebėta. Jos buvo per toli, kad dėl metinio Žemės judėjimo 3×10^{11} metrų atstumu būtų galima išmatuoti jų regimosios padėties pokytį. Buvo išskirta klasė debesų pavidalo šviesulių, kurių paralakso nepastebėta, tad astronomai nusprendė, kad šie objektai (vadinami ūkais) turėtų būti Visatos pakraščiuose. Tokių atstumų matavimai padėjo atskleisti Visatos plitimą; jie aprašyti 27 skyriuje.



2.12 pav. **Žvaigždžių paralaksas dėl Žemės judėjimo aplink Saulę**

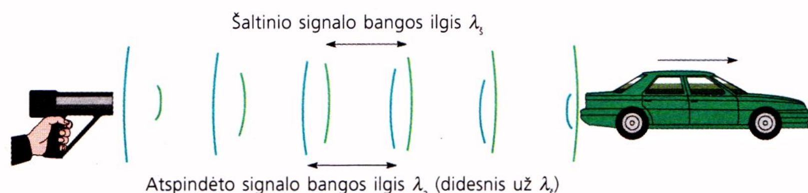
3 KINEMATIKA: GREITIS IR PAGREITIS

Elektromagnetinės bangos, konkrečiai, šviesa ir radijo bangos, gali būti naudojamos ne tik atstumui, bet ir *greičiui* nustatyti. Policininkų radariniuose prietaisuose transporto priemonės greitis matuojamas panaudojant **Doplerio efektą.** Šio efekto esmė tokia.

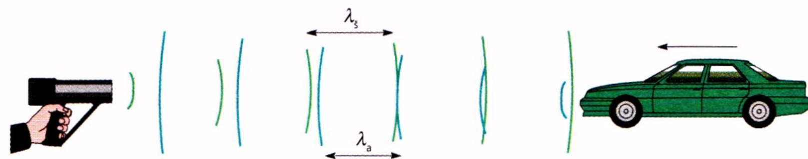
Iš stacionaraus šaltinio link objekto, kuris juda šaltinio atžvilgiu, pasiunčiamas signalas. Nuo judančio objekto atsispindėjusio signalo bangos ilgis (dažnis) skiriasi nuo šaltinio signalo.

Tarkime, objektas pastoviu greičiu tolsta nuo signalo šaltinio. Tada kiekviena banga, pasiųsta judančio šaltinio įkandin, turi nusklisti kiek didesnį nuotolį nei ankstesnė, kad jį pavytų. Atsispindėjusiai bangai tenka įveikti ilgesnį kelią atgal iki šaltinio, negu ankstesnei bangai. Dėl to atspindėtoji banga „ištempiama“ – jos ilgis padidėja, taigi dažnis tampa mažesnis nei šaltinio dažnis. Objektui judant link šaltinio, atvirkščiai, atspindėtos bangos dažnis padidėja.

2.13 paveikslas iliustruoja Doplerio efektą, pasireiškiantį pasiuntus radaro signalą. 2.13a) pav. atspindėto signalo bangos ilgis yra didesnis, o dažnis mažesnis nei šaltinio signalo; 2.13b) pav., kai automobilis juda link šaltinio, bangos ilgis sumažėja, taigi dažnis padidėja. Policininkų naudojamas radarinis prietaisas išmatuoja pasiųsto ir priimto signalų dažnių *skirtumą* ir ekrane parodo transporto priemonės greitį kilometrais per valandą (žr. 2.14 pav.).



a) Automobilis tolsta nuo siųstuvo: atspindėto signalo *dažnis* yra mažesnis už pasiųsto signalo



b) Automobilis artėja link siųstuvo: atspindėto signalo *dažnis* yra didesnis už pasiųsto signalo

2.13 pav. **Doplerio efektas – radaro bangų pokytis, kai jos nukreiptos į transporto priemonę: a) tolstančią nuo šaltinio, b) artėjančią link šaltinio. (Prisiminkite, kad elektromagnetinių bangų greitis visada lygus *c* – šviesos greičiui.)**

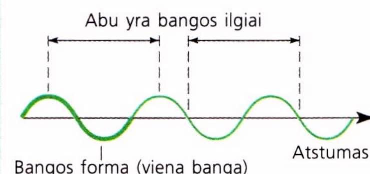
Paprasčiausiu atveju, kai juda tik atspindintis objektas (kaip kad matuojant transporto priemonių greitį), objekto judėjimo greitis v skaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta f = \frac{2fv}{c},$$

kur Δf yra radaro signalo dažnio pokytis, c – šviesos greitis. Šios Doplerio efektą aprašančios formulės išvedimą galite rasti Priede.

Bangos dažnis rodo, kiek kartų per sekundę pasikartoja būdingas bangos pavidalas. **Bangos ilgis** – tai atstumas tarp artimiausių taškų, kurių fazės (nuokrypiai nuo pusiausvyros padėties) vienodos. Bangos **greitis** susijęs su dažniu ir bangos ilgiu:

bangos greitis = dažnis × bangos ilgis



E Kaip manote, ką rodo radarinis prietaisas 2.13a) pav., kuriuo matuojamas nuo automobilio atspindėtos bangos ilgis?



2.14 pav. **Šio prietaiso ekrane matyti, ar transporto priemonė viršijo leistiną greitį, ar ne**

■ Žr. 5 klausimą.

PAVYZDYS

K Policijos radarinis greičio matuoklis veikia 10^{10} Hz dažniu. Nukreiptas į važiuojantį automobilį, jis registruoja 600 Hz dažnio pokytį dėl Doplerio efekto.

a) Kokį greitį rodo matuoklis?

b) Šis rodmuo gali nesutapti su tikruoju automobilio greičiu. Paaiškinkite, kodėl.

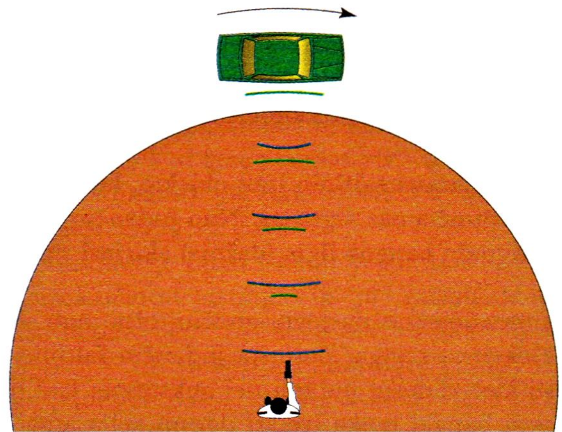
A

a) Naudodamiesi paprasta Doplerio formule $\Delta f = 2fv/c$, gauname:

$$600 = 10^{10} \times \frac{2v}{c}$$

Taigi: $$v = \frac{600 \times 3{,}00 \times 10^{8}}{2 \times 10^{10}} = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b) Matuoklis rodo tikrąjį greitį tuo atveju, kai radaro signalas siunčiamas tiksliai automobilio judėjimo kryptimi. Jei tarp šių krypčių susidaro kampas, tai išmatuotasis greitis mažesnis už tikrąjį. Pavyzdžiui, jei automobilis judėtų statmenai radaro signalo sklidimo krypčiai, kaip parodyta 2.15 pav., tai greičio matuoklis rodytų nulį (siunčiamo ir atspindėto signalo dažniai sutaptų).



2.15 pav. **Greičio skaičiavimas pagal nueitą kelią ir laiką**

Paprasčiausias būdas greičiui nustatyti laboratorijoje ar kasdienėje veikloje – išmatuoti, kokį kelią judantis kūnas įveikia per tam tikrą išmatuotą laiko tarpą:

$$\text{greitis} = \frac{\text{nueitas kelias}}{\text{judėjimo trukmė}}$$

matuojant, pavyzdžiui, metrais per sekundę ar kilometrais per valandą.

Trumpi laiko tarpai gali būti matuojami elektroniniu laikrodžiu, paleidžiamu ir stabdomu šviesos impulsais. Kai kelias ilgesnis, greitis gali būti pakankamu tikslumu išmatuotas paprastu chronometru (minutės, sekundės, sekundės dešimtosios dalies tikslumu). Nueitas kelias matuojamas liniuote, rulete arba apskaičiuojamas pagal žemėlapį.

Pagreitis

Policininkams paprastai nerūpi automobilio *pagreičio* matavimai, o automobilių gamintojams tai labai svarbu. Automobilio pagreitis rodo, kokia sparta kinta greitis:

$$\text{pagreitis} = \frac{\text{greičio pokytis}}{\text{laikas, per kurį pakito greitis}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}).$$

Tai galima užrašyti standartiniais žymenimis:

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t} \qquad [1]$$

kur v_0 yra *pradinis* greitis (laiko atskaitos pradžioje), o v_1 – greitis po t sekundžių.

4 JUDĖJIMO LYGTYS

Realūs kūnai paprastai juda gana sudėtingai. Geriausia pradėti nuo pačių paprasčiausių atvejų, vėliau pereinant prie sudėtingesnių. Pradėsime nuo kūnų, *pastoviai* judančių *tiesia linija*. Aptarsime judėjimą kūnų, kurie juda pastoviu greičiu arba su pastoviu pagreičiu. Be abejo, toks judėjimas labai dažnas – pavyzdžiui, krintantys kūnai juda su pastoviu pagreičiu, lygiu 9,8 m · s^{-2}. Šį judėjimą galime aprašyti grafiškai arba *judėjimo lygtimis*.

Judėjimo grafikai

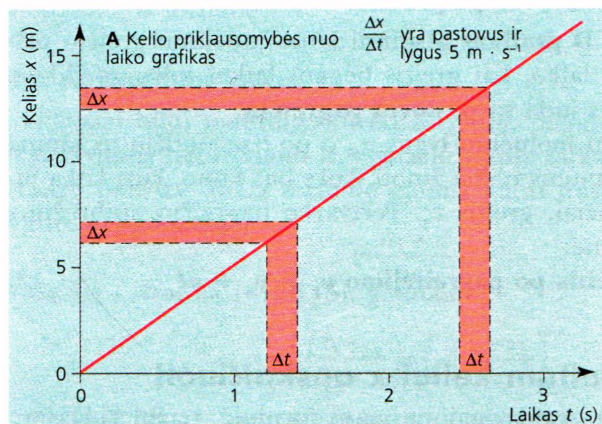
Judėjimo lygtis (kinematikos lygtis) lengviausia išvesti patyrinėjus judėjimą vaizduojančius grafikus.

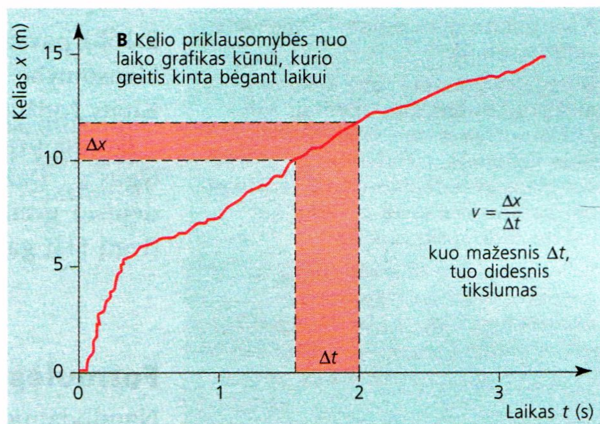
Judėjimas pastoviu greičiu (be pagreičio)

Grafikai A ir B 2.16a) pav. atspindi judėjimą kūno, judančio pastoviu greičiu. **A grafikas** vaizduoja **kelio priklausomybę nuo laiko.** Tai – tam tikru kampu koordinačių sistemoje nubrėžta tiesė, rodanti, kad kūnas per lygius laiko tarpus Δt nueina *lygias* kelio atkarpas Δx.

Greitis apibrėžiamas kaip sparta, kuria per tam tikrą laiką pakinta nueitas kelias. **A grafike** kūnas įveikia 5 m per sekundę: jo greitis yra 5 *metrai per sekundę* (5 m · s^{-1}). Bendru atveju:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$





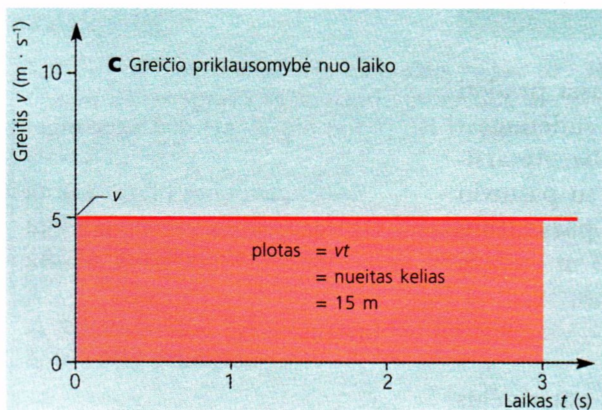
2.16a) pav. **Kūno judėjimo grafikai**

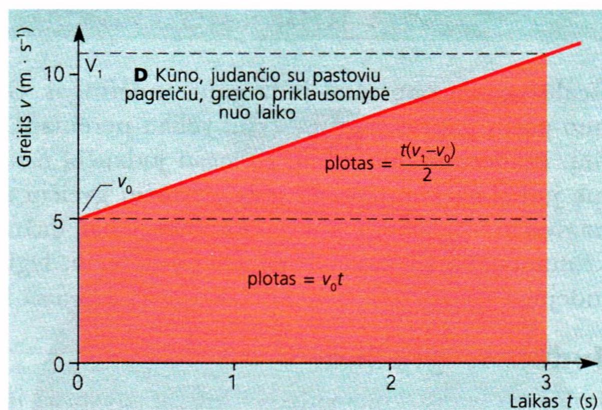
Dydis $\Delta x/\Delta t$ yra šios tiesės posvyris (kampo tangentas). Šis santykis visada rodo greitį, netgi tuomet, kai funkcijos grafikas nėra tiesė. Tačiau jeigu, kaip **B grafike, greitis laikui bėgant keičiasi,** tai, norint gauti tikslų rezultatą, reikia imti labai mažą Δt.

Tačiau 2.16a) paveikslo A grafike ir 2.16b) paveikslo C grafike $\Delta x/\Delta t$ per tam tikrą laiką nepakinta, todėl galime naudoti paprastesnę lygtį:

$$v = \frac{x}{t} \text{ arba } x = vt \qquad [2]$$

Kasdieniame gyvenime, sakykime, ilgoje kelionėje automobiliu, galima v traktuoti kaip *vidutinį* greitį. Vairuotojai iš patirties žino, kad važiuodami vidutiniu, tarkim, 100 km per valandą greičiu, 500 km kelionei jie sugaiš 5 valandas.





2.16b) pav. **Kūno judėjimo grafikai**

Sumanymas mažinti dydžius, tarkime, iki labai mažų verčių Δt, sudaro diferencialinio skaičiavimo pagrindą. Judėjimo lygtys gali būti išvestos naudojant diferencialinį skaičiavimą, kaip sužinosite 24 psl.

C grafikas atspindi **greičio priklausomybę nuo laiko** to paties judančio kūno, kaip ir grafike A. C grafike matyti pastovi v vertė. Panagrinėję šį grafiką galime įžvelgti labai naudingą dėsningumą:

Plotas, susidarantis tarp šią priklausomybę atspindinčio grafiko linijos ir laiko ašies, rodo kelią, nueitą per tam tikrą laiko tarpą.

Taigi nuspalvinta sritis atitinka dydį vt (šiame pavyzdyje – 15 metrų kelią, nueitą per 3 sekundes judant 5 m · s^{-1} greičiu).

Ši taisyklė galioja esant bet kokiai priklausomybei ir yra patogi taikyti nagrinėjant netolyginį judėjimą, atvaizduotą B grafike.

?

F Įvertinkite savo kelionės į mokyklą vidutinį greitį.

G Pagalvokite apie savo kelionę į mokyklą. Nubrėžkite apytikslį kelio priklausomybės nuo laiko grafiką šioje kelionėje. Užrašykite svarbiausias judėjimo charakteristikas bei pažymėkite laiką ir vietą, kur judate didžiausiu greičiu.

H Per kiek laiko su pastoviu 3,2 m · s^{-2} pagreičiu judančio kūno greitis padidės nuo 8 m · s^{-1} iki 24 m · s^{-1}?

Judėjimas su pastoviu pagreičiu

2.16b) paveikslo **D grafikas** atspindi kūno judėjimo greičio priklausomybę nuo laiko, kai greitis bėgant laikui tolygiai didėja. Kitais žodžiais, jis juda su **pastoviu pagreičiu.**

Greitis pradiniu momentu lygus v_0, o po t sekundžių jis tampa lygus v_1. Dažnai mums reikia žinoti, koks bus kūno, kurį laiką judėjusio greitėjančiai, greitis v_1. Pertvarkę pagreičio apibrėžimą (lygtį [1]) gauname:

greitis po pagreitėjimo $\boldsymbol{v_1 = v_0 + at}$ [3]

Formulės nueitam keliui x apskaičiuoti

Naudodamiesi D grafiku galime gauti formulę, pagal kurią apskaičiuotume kelią, kurį tolygiai greitėdamas kūnas nueina per laiką t. Čia pritaikome taisyklę, kad per laiką t nueitas kelias yra lygus atitinkamos srities šiame grafike plotui.

Žr. 7 klausimą.

Ši D grafike pavaizduota sritis sudaryta iš stačiakampio ir trikampio. Stačiakampio plotas lygus $v_0 t$, kur v_0 yra greitis, kai $t = 0$ (pradinis greitis). Trikampio plotas yra lygus

$$\frac{1}{2}(v_1 - v_0)t$$

Taigi viso per laiką t nueito kelio x lygtis yra tokia:

kelias = bendras srities plotas

$$\boldsymbol{x = v_0 t + \frac{1}{2}(v_1 - v_0)t} \qquad [4]$$

arba $$x = \frac{1}{2}(v_0 + v_1)t\,,$$

arba: kelias = vidutinis greitis × laikas

Ši formulė praverčia žinant dydžius v_0 ir v_1. Praktikoje dažnai žinomas vienas iš jų (arba v_0, arba v_1) ir pagreitis a.

Kai nežinomas galutinis greitis v_1

Matėme, kad a galima apibrėžti parametrais v_0, v_1 ir t, kaip lygtyje [1]:

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t},$$

kurios pavidalas gali būti toks:

$$v_1 - v_0 = at$$

Įrašę $(v_1 - v_0)$ į lygtį [4] gauname:

$$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad [5]$$

Kai nežinomas pagreitis a

Nežinant pagreičio, galima pasinaudoti *vidutiniu* greičiu. Kai pagreitis pastovus, galime laikyti, kad kūnas visą laiką juda tam tikru greičiu, kuris yra lygus pradinio ir galinio greičių *vidurkiui*. Tada:

kelias = vidutinis greitis × laikas

arba:

$$x = \frac{1}{2}(v_0 + v_1)t \qquad [6]$$

Tai iliustruoja ir 2.16b) paveikslo grafikas D. Patikrinkite šią priklausomybę – supaprastinkite lygtį [4], stačiakampio ir trikampio plotų sumos formulę.

Kai nežinomas laikas t

Galiausiai būtų naudinga turėti formulę, pagal kurią atliktume skaičiavimus neturėdami informacijos apie laiką, per kurį įvyko greičio pokytis. Tokią formulę galima gauti įrašius t reikšmę. Iš lygties [1] gauname:

$$t = \frac{v_1 - v_0}{a}$$

Įrašę šią t išraišką į lygtį [5], gauname:

$$x = v_0\left(\frac{v_1 - v_0}{a}\right) + \frac{1}{2}a\left(\frac{v_1 - v_0}{a}\right)^2$$

Įsitikinkite patys, kad supaprastinę gautume:

$$v_1^2 - v_0^2 = 2ax \qquad [7]$$

?

I a) Berniukas paleidžia riedėti padangą. Ji rieda nuo kalvos su 3 m · s^{-2} pagreičiu. Kokį kelią ji nuriedės per 8 s?

b) Berniukas bando bėgti greta. Didžiausias jo greitis yra 4 m · s^{-1}. Kokį atstumą berniukas įstengs bėgti neatsilikdamas nuo padangos?

?

J Atvaizduokite greičio priklausomybę nuo laiko, aprašančią vertikaliai į viršų mesto kūno judėjimą. Kokie jos būdingi požymiai?

■ Žr. 8, 9 ir 10 klausimus.

PAVYZDYS

K Vanagas sklando virš lauko 50 metrų aukštyje. Pamatęs apačioje pelę, jis 9 m · s^{-2} pagreičiu neria vertikaliai žemyn.

a) Kokiu greičiu jis sklęs prieš pat pasiekdamas žemę?

b) Kiek truks laiko vanagui pasiekti žemę?

A

a) Mums reikia apskaičiuoti galutinį greitį. Žinome kelią, pradinį greitį ir pagreitį. Kadangi nežinome laiko, per kurį nueitas šis kelias, naudojame lygtį [7]: $v_1^2 - v_0^2 = 2ax$. Pradinis vanago greitis žemės atžvilgiu v_0 lygus nuliui, todėl

$$v_1^2 - 0 = 2 \times 9 \times 50 = 900$$

taigi $v_1 = 30$ m · s^{-1}

b) Laikui apskaičiuoti galima panaudoti bet kurią lygtį, į kurią įeina t (išskyrus lygtį [2], kai pagreitis lygus nuliui); paprasčiausia yra lygtis [3] $v_1 = v_0 + at$:

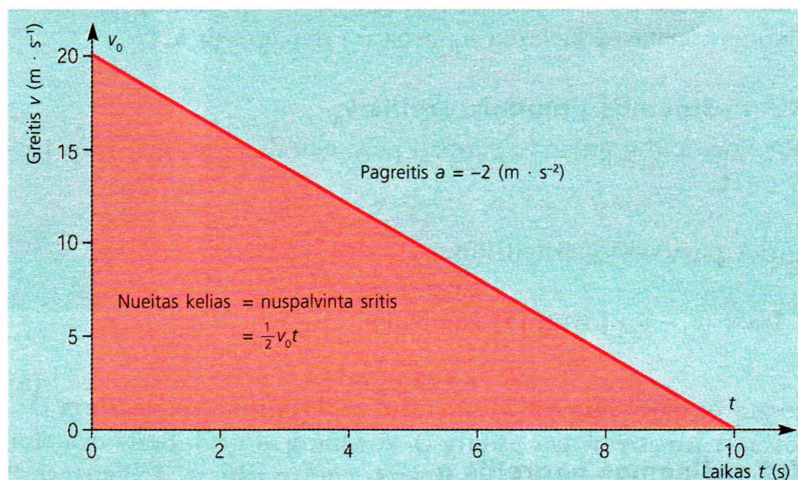
$$30 = 0 + (9 \times t),$$

iš kur $t = 3{,}3$ s

Atkreipkite dėmesį, kad atsakymas yra tik apytikslis. Fizika supaprastina realią situaciją – vanagai skraido ne visai pagal lygtis!

Tolygiai lėtėjantis judėjimas

Lėtėjantis judėjimas yra judėjimas su *neigiamu* pagreičiu.



2.17 pav. **Tolygiai lėtėjančio judėjimo grafikas. Įsitikinkite, kad nuspalvintos srities plotas atitinka 100 m kelią**

?

K Dviratininkas nemindamas pedalų leidžiasi nuo kalno su 2,5 m · s^{-2} pagreičiu.

a) Per kiek laiko dviratininko greitis padidės nuo 5 m · s^{-1} iki 20 m · s^{-1}?

b) Įrodykite, kad dviratininkas per tą laiką nuvažiuos apie 75 m.

c) Ar būtų racionalu taikyti šiame skyriuje pateiktas judėjimo lygtis skaičiuojant dviratininko greitį, jei šlaitas būtų kilometro ilgio? Pagrįskite savo atsakymą.

Žr. 11 ir 12 klausimus ■

2.17 paveiksle pavaizduota priklausomybė aprašo tolygiai lėtėjantį kūno judėjimą iki jis sustoja. Kaip ir anksčiau, trikampio plotas rodo nueitą kelią. Judėjimo lygtys tinka ir čia, tik reikia atkreipti dėmesį į *ženklus*. Į formules įrašomiems *skaičiams* privalomas teigiamas ar neigiamas ženklas. Tarkime, pradinis greitis yra lygus 20 m · s^{-1}, o neigiamas pagreitis lygus –2 m · s^{-2}. Jei norime pagal lygtį [5] apskaičiuoti, kokį kelią nueis kūnas per 10 sekundžių, rašome:

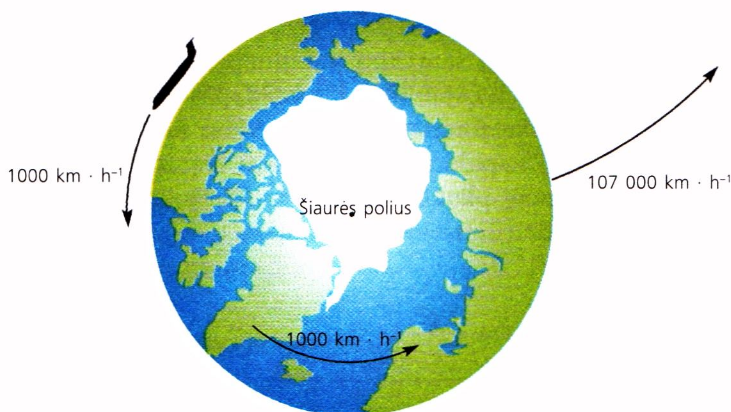
$$\text{nueitas kelias} = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$
$$= (20 \times 10) + [0{,}5 \times (-2) \times 10^2]$$
$$= 200 - 100$$
$$= 100\,\text{m}$$

5 ATSKAITOS SISTEMOS

Koks jūsų momentinis judėjimo greitis

Galbūt atsakymas priklauso nuo to, ar jūs skaitote šią knygą 140 km · h^{-1} greičiu judančiame traukinyje, ar lėktuve, kuris skrenda 1000 km · h^{-1} greičiu, ar tiesiog sėdite prie savo rašomojo stalo? *Iš tikrųjų taip suformuluotas klausimas yra beprasmis.*

Jeigu jūs sėdite prie savo rašomojo stalo, ir jūs, ir stalas sukatės kartu su Žeme greičiu, didesniu kaip 1000 km · h^{-1} (jei esate Londono platumoje). Pati Žemė sukasi orbita aplink Žemę 107 000 km · h^{-1} greičiu. O Saulė su visa Saulės sistema skrieja aplink Galaktikos centrą beveik 1 000 000 km · h^{-1} greičiu. Jūs, žinoma, nejaučiate nė vieno iš šių judėjimų. Šie astronominiai greičiai nesudrebina kavos jūsų puoduke. Šis poskyrio pradžioje suformuluotas klausimas turi prasmę tik tuo atveju, jei pridėsite tokius žodžius kaip „kambario atžvilgiu“, ar „Žemės atžvilgiu“, ar „Galaktikos centro atžvilgiu“.



2.18 pav. **Kokiu greičiu jūs judate, kai skrendate lėktuvu?**

Tai paaiškina **bendrasis reliatyvumas,** kurį septynioliktajame amžiuje pirmasis paskelbė G. Galilėjus. Tik gerokai vėliau, dvidešimtojo amžiaus pradžioje, šią reliatyvumo teoriją išvystė Albertas Einšteinas (*Albert Einstein*). Ją aptarsime tolimesniuose skyriuose.

Mes nuolat atliekame matavimus Žemės atžvilgiu ir laikome ją nejudama bei įprasta **atskaitos sistema.** Ši frazė reiškia, kad atliekame matavimus nejudančio savęs paties ir aplinkinių daiktų atžvilgiu. Taigi kai atliekame bandymą su vežimėliu, judančiu 0,55 m · s^{-1} greičiu, suprantama, manome, kad tai judėjimas sienų, grindų ir laboratorinio stalo atžvilgiu. Mums nekyla klausimas: „kieno atžvilgiu?" Tačiau kyla sunkumų susidūrus su uždaviniais, kai mūsų atskaitos sistema juda Žemės atžvilgiu, tarkime, laivas jūroje, lėktuvas, skrendantis virš Žemės, ar kanoja tvinstančioje upėje.

?

L Sakoma: „Pirminis pastovus taškas turėtų būti Visatos centras. Visa, kas juda, turi turėti absoliutų greitį jo atžvilgiu." Ar sutinkate su šiuo teiginiu? Ar panašu, kad tai turėtų praktinę naudą?

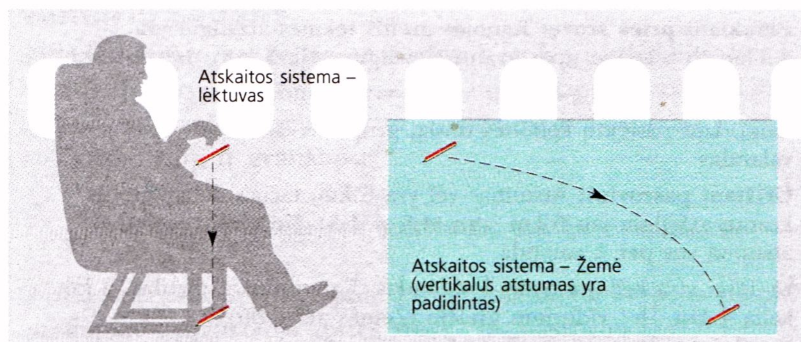
Judamosios atskaitos sistemos

14–17 puslapiuose išvestos judėjimo lygtys tiek pat gerai tinka lėktuve, tam tikru greičiu skrendančiame Žemės atžvilgiu, kiek ir kūnams „nejudamame" Žemės paviršiuje.

Numetus ant lėktuvo grindų rašiklį jums atrodo, kad jis juda lygiai taip pat, kaip kad judėtų mokyklos klasėje. Nebūtina paisyti, kad per tris dešimtąsias sekundės, kurias krinta rašiklis, jis pasislenka maždaug šimtą metrų lėktuvo skridimo kryptimi. Jūs taip pat judate į priekį tuo pačiu greičiu, todėl jūsų atžvilgiu rašiklis krinta tiesiai žemyn. Jūs ir rašiklis esate toje pačioje atskaitos sistemoje – lėktuve. Ir jums, ir rašikliui galioja lygtis $v = at$, jei norite apskaičiuoti greitį, kuriuo rašiklis pasieks grindis.

?

M Lėktuvas juda horizontaliai 250 m · s^{-1} greičiu. Jame numestas rašiklis krinta 0,8 m. Kokiu atstumu nuo taško, iš kurio buvo išmestas rašiklis, jis pasiekia grindis: a) lėktuvo atžvilgiu, b) Žemės atžvilgiu? Tarkime, laisvojo kritimo pagreitis yra lygus 10 m · s^{-2}.



2.19 pav. **Lėktuve krintantis rašiklis dviejų atskaitos sistemų atžvilgiu. Vienoje atskaitos sistemoje jo trajektorija yra tiesė, kitoje ji tampa parabole**

Galilėjus, judančią atskaitos sistemą iliustruodavęs burlaivio pavyzdžiu, atkreipė dėmesį į santykinį judėjimą. Jam šios sąvokos prireikė aiškinant, kodėl Žemė gali mums nepastebimai judėti. Vis dėlto Galilėjaus laikų žmonėms buvo taip pat sunku suprasti, kaip Žemė gali judėti nepalikdama visko, kas yra ant jos – jūrų, laivų, oro ir skraidančių paukščių – kaip ir šiuolaikiniams žmonėms yra sunku suvokti Einšteino reliatyvumo teorijas!

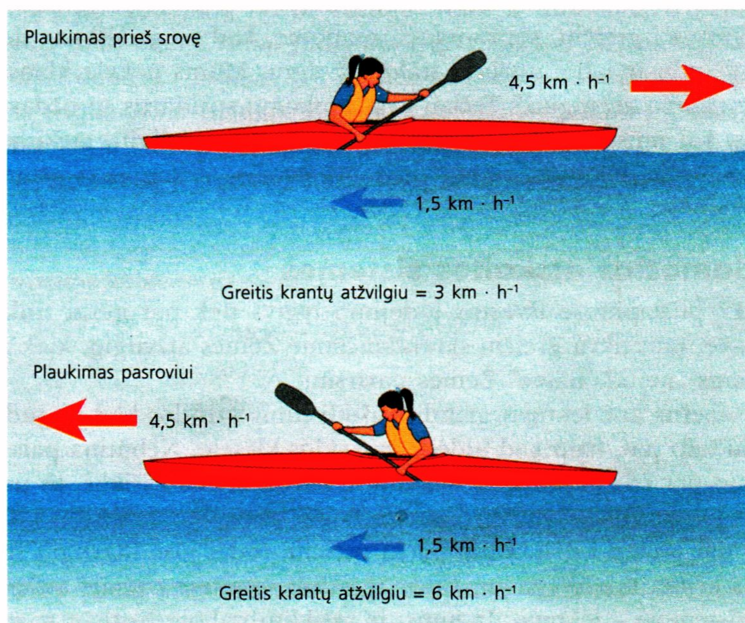
PAVYZDYS

K Kanojininkai planuoja kelionę upe prieš srovę ir atgal; vidutinis upės tėkmės greitis yra 1,5 km · h^{-1}. Kanojininkai irkluos 6 km prieš srovę, paskui grįš atgal. Vadovas apskaičiavo, kad stovinčiame vandenyje grupė gali plaukti 4,5 km · h^{-1} vidutiniu greičiu.

a) Kiek truks kelionė, jei neįskaitysime sustojimų poilsiui ar užkandžiui?

b) Koks yra grupės (numatomas) vidutinis greitis šioje kelionėje?

A Vadovas turi suprasti, kad atskaitos sistema yra Žemė, kurios atžvilgiu atstumas yra 6 km į abi puses, kaip pažymėta žemėlapyje.



2.20 pav. **Irklavimas prieš srovę ir pasroviui**

a)

Plaukiant prieš srovę: Kanojos greitis tėkmės atžvilgiu yra 4,5 km · h^{-1}, tačiau upės krantų atžvilgiu – tik 3 km · h^{-1} (4,5 – 1,5).

$$t = x/v = 6/3 = 2 \text{ valandos}$$

Taigi, kad pasiektų kelionės tikslą, grupei teks irkluoti prieš srovę 2 valandas.

Grįžtant pasroviui: Atstumas vėl yra 6 km, tačiau dabar greitis krantų atžvilgiu jau 6 km · h^{-1} (4,5 + 1,5). Jie turėtų įveikti šį atstumą vos per 1 valandą.

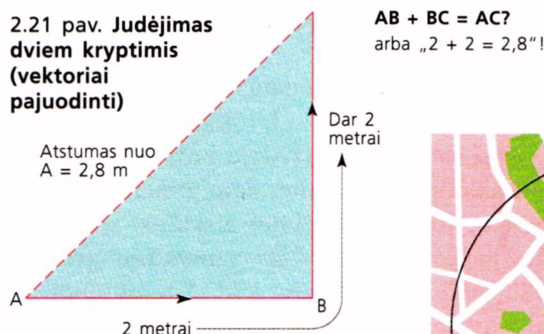
b) Taigi visa kelionė truks 3 valandas. Kanojininkai plauks 12 km kelią 4 km · h^{-1} vidutiniu greičiu (Žemės atžvilgiu).

Žr. 13 klausimą.

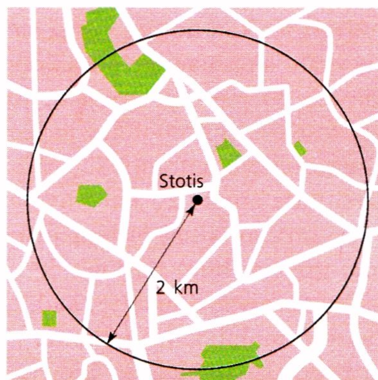
6 VEKTORIAI

Kai 2 + 2 nelygu 4: vektorių svarba

Kaip parodyta 2.21 pav., jei jūs pajudate 2 metrus į kairę, po to 2 metrus pirmyn, tai nueinate 4 metrus, tačiau nuo tos vietos, iš kur pradėjote judėti, nutolstate tik 2,8 metro. Tai pavyzdys, kai „kokį atstumą jūs nuėjote" reiškia ne tą patį kaip „kokiu atstumu jūs nutolote nuo pradinio taško".



2.21 pav. **Judėjimas dviem kryptimis (vektoriai pajuodinti)**



2.22 pav. **Nepakanka nurodyti atstumą: visi apskritimo taškai nutolę nuo stoties 2 km atstumu**

2.2 lentelė. **Kai kurie dažnai fizikoje vartojami vektoriai ir skaliarai**

Skaliarai	Vektoriai
Dažnis	Nuokrypis
Sparta	Greitis
Masė	Pagreitis
Tankis	Judesio kiekis
Energija	Jėga
Krūvis	Srovės stipris
Varža	Elektrinio lauko stipris

Tai akivaizdus pavyzdys, kad kai kurių fizikinių dydžių vertės nedaug tereiškia, jei nenurodyta ir *kryptis*. Pavyzdžiui, nedaug naudos, jei savo draugams pasakysite, kad gyvenate 2 km atstumu nuo stoties. Ši informacija nėra pakankama: kaip pavaizduota 2.22 pav., panorėję rasti jūsų namą jie turėtų ieškoti išilgai apskritimo, kurio spindulys 2 km!

Dydžiai, kuriems visiškai apibrėžti reikia žinoti ir jų skaitinę vertę, ir kryptį, vadinami **vektoriniais dydžiais** (arba **vektoriais**). Tokie dydžiai, kurių prasmė nenukenčia nenurodžius krypties, vadinami **skaliariniais dydžiais** (arba **skaliarais**). Keletas dažniausiai vartojamų vektorių ir skaliarų yra pateikta 2.2 lentelėje. Greitis yra vektorius; jis nusako judėjimo spartą tam tikra kryptimi. Sparta yra dydis, reikalingas tik greičio skaitmeninei vertei apibrėžti. Naudinga, pavyzdžiui, žinoti, kad palydovo judėjimo apskritimine orbita *sparta* yra pastovi, nors *greitis* nuolat kinta, kintant judėjimo krypčiai. Daugiau apie palydovų judėjimą rasite 4 skyriuje.

?

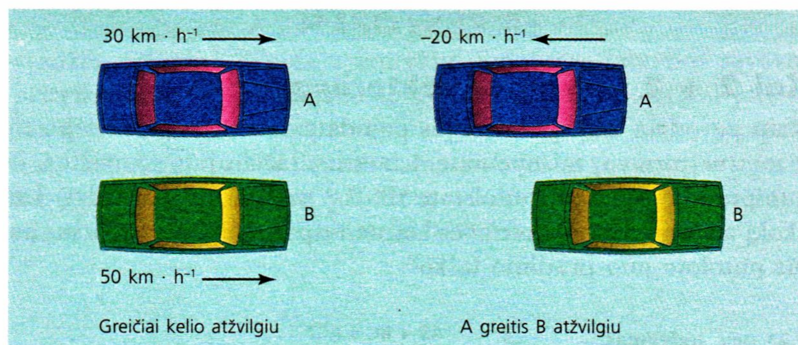
N Ar šie dydžiai yra vektoriai, ar skaliarai? Pagrįskite atsakymus: **a)** slėgis, **b)** svyravimų periodas, **c)** tūris.

Vektorių sudėtis

Sudedant vektorius reikia atsižvelgti ne tik į jų dydžius, bet ir į kryptis. Jei kryptys priešingos ir yra toje pačioje tiesėje, tai viena kryptis vadinama teigiama, kita – neigiama ir laikomasi to paties susitarimo kaip ir grafikuose:

Judėjimas dešinėn yra teigiamas, kairėn – neigiamas.

(Ankstesniame pavyzdyje apie kanojų plaukimą krypčiai nusakyti naudojomės sąvokomis „prieš srovę" ir „pasroviui".)



2.23 pav. **Reliatyvumas kelyje**

Įsivaizduokite du automobilius, važiuojančius keliu ta pačia kryptimi, vienas 30 km · h^{-1}, kitas 50 km · h^{-1} greičiu (2.23 pav.). Akivaizdu, kad automobiliai vienas kito atžvilgiu juda 20 km · h^{-1}. Jei esate lėtesniajame automobilyje, matysite, kaip greitesnysis lenkia jus 20 km · h^{-1} greičiu. Jūsų (judančioje) atskaitos sistemoje greitesnysis automobilis juda +20 km · h^{-1} santykiniu greičiu. Greitesniuoju automobiliu važiuojantis mato, kad jūsų automobilis tarsi juda atgal –20 km · h^{-1} santykiniu greičiu.

Jei automobiliai judėtų priešingomis kryptimis, tai jų santykiniai greičiai būtų 80 km · h^{-1}.

Dabar įsivaizduokime, kad kažkoks daiktas išmetamas iš judančio automobilio. Jei metama į priekį 10 km · h^{-1} greičiu iš automobilio, kuris juda 30 km · h^{-1} greičiu, tai stovinčiųjų šalikelėje atžvilgiu daiktas išlėks dar pavojingesniu 40 km · h^{-1} greičiu.

?

O Vaikas traukinyje varinėja grindimis kamuolį išilgai vagono 5 m · s^{-1} greičiu. Traukinys juda 35 m · s^{-1} greičiu. **a)** Ką dar jums reikėtų žinoti, kad galėtumėte nustatyti kamuolio greitį geležinkelio bėgių atžvilgiu? **b)** Kokios yra šio santykinio greičio galimų verčių ribos?

Kūnai, judantys kampu vienas kito atžvilgiu

Kaipgi įmanoma aprašyti judėjimą, jei jį apibūdinantys vektoriai nėra vienoje tiesėje? Šis klausimas nuolat kyla tiems, kas plaukia vandeniu ar skrenda. Jų transporto priemonės juda aplinka, kuri pati juda. Dažnai judėjimą veikia potvynio srovės arba vėjas. Tarkime, 20 psl. pavyzdyje minėti kanojininkai turi perplaukti plačias upės žiotis, kur teka stipri 3 km · h^{-1} srovė (žr. 2.24 pav.). Kaip ši srovė paveiks jų judėjimą?

Kaip parodyta 2.24 pav., jiems nuplaukus skersai upės 4,5 ilgio vienetų atstumą upė juos nuneš pasroviui 3 ilgio vienetus. Upės krantų atžvilgiu jie juda išilgai atkarpos AC 5,4 km · h^{-1} greičiu, kurį galime apskaičiuoti naudodamiesi Pitagoro teorema. Šis kelias nenuves į jų kelionės tikslą!

Kanojininkams būtų protingiau irkluoti prieš srovę tokiu kampu, kad jų irklavimo greičio ir srovės greičio sumos kryptis sutaptų su kryptimi, kuria jie norėtų judėti. Šis suminis greitis vadinamas **atstojamuoju greičiu.**

Žr. 15 klausimą.

Kokiu kampu krypties AX skersai upės atžvilgiu jie turėtų nukreipti savo kanojas? Panagrinėkime 2.25 pav. Jei braižoma tinkamu masteliu, galima išmatuoti kampus ir atstojamosios vertę. Dažnai patogiau yra apskaičiuoti kampą θ remiantis elementariomis trigonometrijos formulėmis:

$$\sin\theta = 3/4{,}5 = 0{,}667$$

Taigi

$$\theta = 42°$$

Kanojininkai judėtų išilgai linijos AX greičiu, kurį nusako:

$$\text{tg}\ \theta = 3/\text{greitis}$$

Apskaičiavę gausime greitį 2,35 km · h^{-1}.

Tikslas

!!

Upės tėkmės greitis 3,0 km · h⁻¹

3,0 km · h⁻¹

Kol kanojininkai nuirkluoja 4,5 ilgio vienetų, tėkmė nuneša 3,0 ilgio vienetus

Atstojamasis kelias

4,5 km · h⁻¹ vandens atžvilgiu

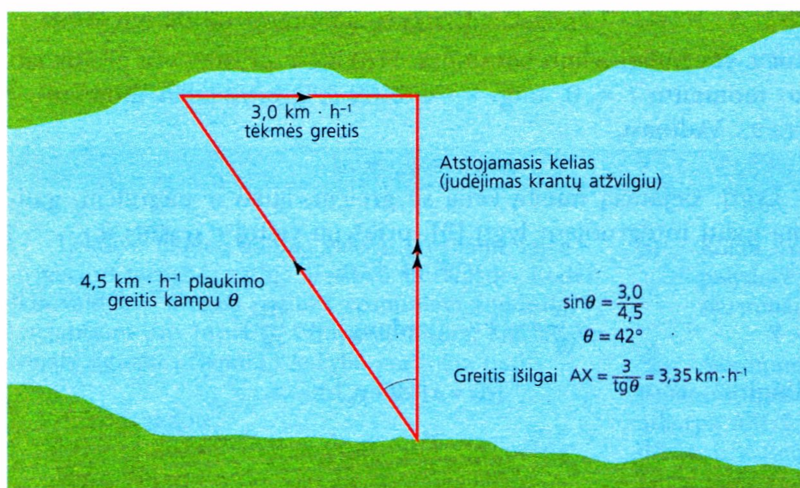
5,4 km · h⁻¹

$AC^2 = AB^2 + BC^2$

A

Startas

2.24 pav. **Srovės nunešti**

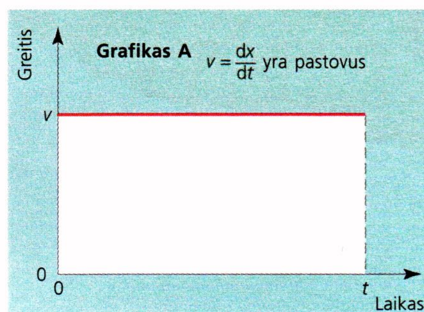


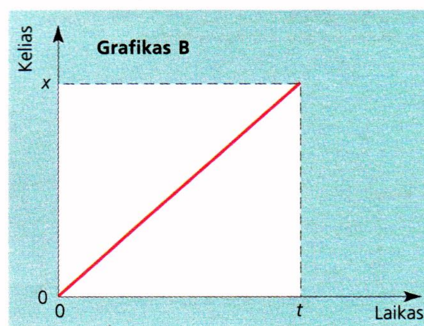
2.25 pav.

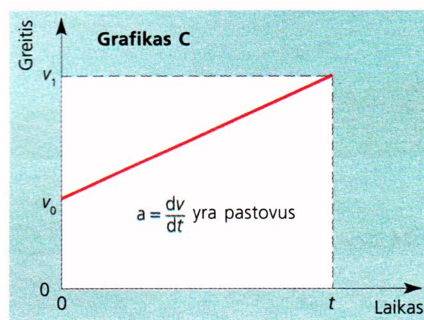
?

P a) Lėktuvas ore išvysto 500 km · h⁻¹ greitį ir skrenda šiaurės kryptimi. Jis patenka į atmosferos srovę, sklindančią rytų kryptimi 100 km · h⁻¹ greičiu. Koks lėktuvo greitis žemės atžvilgiu?

b) Atmosferos sroves atrado karinė aviacija per Antrąjį pasaulinį karą, kai buvo pastebėta, kad skrydžiai per Atlantą iš rytų į vakarus užtrukdavo gerokai ilgiau nei priešinga kryptimi. Oro srovės greitis 400 km · h⁻¹. Kokio trukmės skirtumo galime tikėtis 6000 km nuotolio skrydžiuose per Atlantą, jei lėktuvas skrenda maždaug 100 km · h⁻¹ greičiu?







Judėjimo lygtys naudojant diferencialinį ir integralinį skaičiavimą

Pastoviu greičiu judantis kūnas

Kaip parodyta grafike A, kūnas juda pastoviu greičiu v, kuris nusako įveikto kelio kitimo spartą:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

arba:

$$dx = v dt$$

Per laiką t jis įveikia kelią x. Galime rasti x kaip „plotą po grafiku" grafike B integruodami ribose nuo 0 iki t:

$$\int dx = v \int dt$$

taigi:

$$x = vt + \text{const} \qquad [1]$$

Jei pradiniu laiko momentu $t = 0$ x buvo lygus nuliui, tai konstanta lygi nuliui ir tuomet:

$$x = vt \qquad [2]$$

Greitėjantis judėjimas

Pagreitis rodo greičio kitimo spartą (grafikas C), t. y.

$$\frac{dv}{dt} = a$$

arba

$$dv = a\, dt$$

Pastarąją lygtį galime suintegruoti ir rasti sąryšį tarp greičio, pagreičio ir laiko:

$$\int dv = a \int dt \qquad [3]$$

$$v = at + c,$$

kur c yra integravimo konstanta. Fizikinė c prasmė yra greitis laiko momentu $t = 0$, taigi v_0. Greitis v, greitis laiko momentu t yra v_1. Vadinasi,

$$v_1 = v_0 + at \qquad [4]$$

Lygtį, siejančią nueitą kelią su greičiu, laiku ir pagreičiu, galima gauti integruojant lygtį [3], prieš tai vietoj c įrašius v_0:

$$v = at + v_0$$

t. y.

$$\frac{dx}{dt} = at + v_0 \quad (\text{kadangi } v = \frac{dx}{dt}).$$

Taigi:

$$\int dx = a \int t dt + v_0 \int dt$$

$$x = a\frac{t^2}{2} + v_0 t + C$$

C yra kita integravimo konstanta, rodanti x vertę laiko momentu $t = 0$. Ji skaičiavimuose dažniausiai prilyginama nuliui. Tada gaunama paprastesnė lygtis [5] (žr. 17 psl., būtent

$$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2.$$

Lygtis [7], $v_1^2 - v_0^2 = 2ax$, gali būti gauta įrašius kintamuosius, kaip 17 puslapyje.

SANTRAUKA

Šiame skyriuje pateikti aiškinimai padės jums suprasti kai kurias sąvokas ir įgauti skaičiavimo įgūdžių. Tikimės, kad jį perskaitę jūs

- Suprasite, kad atstumas gali būti matuojamas ne tik ilgio vienetais, kaip metras ar kilometras, bet ir laiko vienetais (sekundėmis).
- Sužinosite, kad atstumo matavimai iš esmės remiasi šviesos greičiu *c*.
- Sužinosite, kad judėjimo matavimo rezultatai priklauso nuo pasirinktos atskaitos sistemos.
- Išnagrinėsite nueito kelio ir greičio priklausomybių nuo laiko grafikus.
- Išmoksite naudotis judėjimo lygtimis, aprašančiomis pastoviu pagreičiu tiesiai judančių kūnų judėjimą.
- Imsite skirti vektorinius ir skaliarinius dydžius.
- Nagrinėdami vektoriais aprašomą judėjimą naudositės vektorinėmis diagramomis arba/ir išmoksite atlikti trigonometrinius skaičiavimus.
- Suprasite trianguliacijos pagrindus.

Jums reikėtų įsiminti šias **judėjimo lygtis:**

- **Judėjimo pastoviu greičiu** (arba vidutiniu greičiu):

  kelias = (vidutinis) greitis × laikas

  $x = vt$

- Esant **pastoviam (stacionariam) pagreičiui:**

a) $$\text{pagreitis} = \frac{\text{greičio pokytis}}{\text{laikas, per kurį jis įvyko}}$$

$$a = \frac{v_1 - v_0}{t} \text{ arba } a = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

arba paprasčiau: $v_1 = v_0 + at$.

b) nueitas kelias = vidutinis greitis × laikas

$$x = \frac{v_1 + v_0}{2}t,$$

arba: $$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

Kai t nežinomas, naudojame lygtį

$$v_1^2 - v_0^2 = 2ax$$

c) Esant netolyginiam judėjimui, reikia imti mažus pokyčius:

$\Delta x = v\Delta t$, arba diferencialine išraiška $v = \frac{dx}{dt}$

$\Delta v = a\Delta t$, arba diferencialine išraiška $a = \frac{dv}{dt}$

KLAUSIMAI

1 Lėktuvo modelį galima valdyti „realiame laike" navigacijos tarnybos radijo siųstuvo vairalazde. Kodėl tokia valdymo sistema netinka kosminiam zondui, skriejančiam pro Jupiterį, valdyti? (Tarkim, kad abiem atvejais signalo priėmimo kokybė yra tokia pati.)

2 Apskaičiuokite:

a) Lėktuvo atstumą (kilometrais) nuo oro uosto, kurio radaras rodo, kad šis atstumas laiko vienetais yra 1,67 ms.

b) Laiką, per kurį radijo pranešimas iš Žemės pasieks Marsą, kai jie nutolę minimaliu atstumu, lygiu $7{,}83 \times 10^7$ km.

3

a) Vertikaliai veikiantis kartografavimui naudojamo palydovo radaras zonduoja iš pradžių jūros paviršių, po to pakrantės uolą. Jis užfiksuoja, kad signalo sklidimo trukmė pakinta 1,17 mikrosekundžių. Įrodykite, kad uola yra 175 m aukščio.

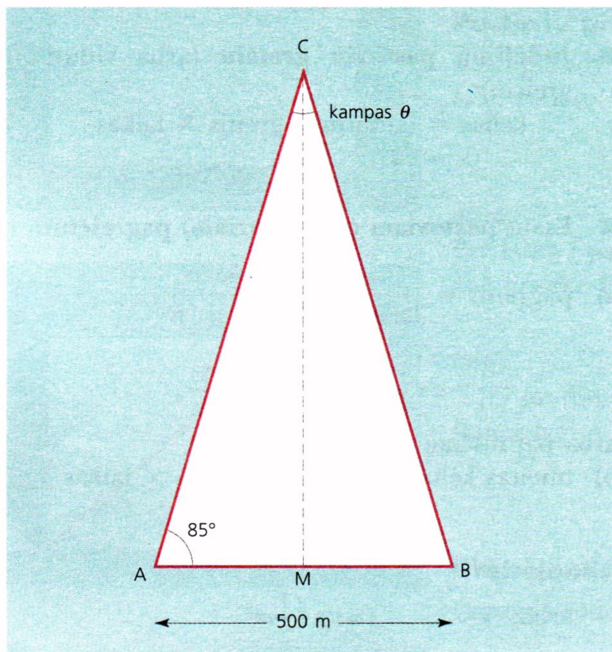
b) Kokiu tikslumu turi būti fiksuojamas laikas palydove, iš kurio matuojami 0,3 m aukščių skirtumai?

4 Astronomai atstumui iki artimiausių žvaigždžių išmatuoti naudojasi bazine atkarpa (ją atitinka atkarpa AM 2.K6 paveiksle), kuri lygi 499 šviessekundėms, t. y. Žemės sukimosi aplink Saulę spinduliui. Išmatuotas kampas, atitinkantis kampą ACB, vadinamas žvaigždės *paralaksu*.
Paralaksų kampai dviem žvaigždėms pateikti lentelėje. Apskaičiuokite atstumą nuo Žemės šviesmečiais.

Žvaigždė	Paralaksas (°)
Sirijus	$1{,}05 \times 10^4$
Kentauro alfa	$2{,}07 \times 10^4$

5 Radarinis greičio matuoklis, skirtas lėktuvo greičiui nustatyti, rodo 8 kHz dažnio pokytį. Radaro darbinis dažnis yra 10^{10} Hz. Koks lėktuvo greitis matuoklio atžvilgiu?

6 Panagrinėkite 2.K6 paveikslą. Trianguliacijos bokšto C padėtį nustatinėjantys matininkai naudojasi 500,0 m ilgio bazine atkarpa AB.



2.K6 pav.

a) Patikrinkite pagal priklausomybę ir įsitikinkite, kad nuotolis CM yra 2858 m.
tg(85,00°) = CM/250

b) Jei trianguliacijos bokštas C būtų daug toliau, kampai MAC ir MBC taptų beveik 90°, o kampas ACB sumažėtų iki nulio. Įrodykite, kad jei θ = 0,20°, tai nuotolį CM galime gana tiksliai nustatyti pagal formulę
tg(0,10°) = 250/CM,
arba pagal formulę
sin(0,10°) = 250/CM.
Paaiškinkite, kodėl taip yra.

7 Nupieškite iš rankos (be skaitinių verčių) grafikų eskizus, vaizduojančius greičio priklausomybę nuo laiko, tokiems judantiems kūnams:

a) Automobilio, pajudėjusio iš vietos ir greitėjančio iki tam tikro pastovaus greičio.

b) Akmens, paleisto žemyn nuo aukšto pastato stogo.

c) Vertikaliai į viršų mesto teniso kamuoliuko nuo to momento, kai paleidote jį iš rankos, iki vėl jį pagavote.

d) Teniso kamuoliuko, kuris, paleistas žemyn iš maždaug trijų metrų aukščio, atšoko vieną kartą.

8 Moksleivė nori nustatyti šulinio gylį. Chronometru ji nustatė, kad garsas, kurį sukėlė į vandenį pliumptelėjęs akmenukas, ją pasiekė po 4,7 s nuo to momento, kai ji paleido akmenuką į šulinį.

a) Remdamiesi šiuo rezultatu bei laisvojo kritimo pagreičio verte (9,8 m · s^{-1}) apskaičiuokite šulinio gylį.

b) Nurodykite du faktorius, turinčius įtakos gautos vertės tikslumui. Kuris iš jų, jūsų nuomone, yra svarbesnis?

9 Grafiškai atvaizduokite pateiktus duomenis, apibūdinančius kosminio zondo, tiesia linija skriejančio nuo Žemės, judėjimą.

Laikas (s)	0	100	200	300	400	500	600
Greitis (m · s^{-1})	5374	5329	5283	5238	5193	5147	5102

a) Ar grafiko forma jums apibūdina kosminio zondo judėjimą? Kaip?

b) Apskaičiuokite (grafiškai ar kaip nors kitaip) neigiamą kosminio aparato pagreitį.

10 Pasirinkite tinkamą judėjimo lygtį (arba lygtis) ir, naudodamiesi toliau pateiktais duomenimis, atsakykite į šiuos klausimus.

a) Kokį atstumą nuskris lėktuvas per 4 valandas, jeigu jo vidutinis greitis lygus 600 m · s^{-1}, o priešpriešiais pučia 50 m · s^{-1} vėjas?

b) Per kiek laiko galima tikėtis nuvažiuoti iš Londono į Edinburgą, jei vidutinis automobilio greitis yra lygus 100 km · h^{-1}?

c) Kiek truktų kelionė iš Žemės į artimiausią žvaigždę Kentauro Proksimą, jei aparatas skrietų 0,2c greičiu?
(Šviesos greitis c = 3,00 × 10^8 m · s^{-1}.)

d) Kosminis aparatas palieka Žemės orbitą (kurioje jo greitis Žemės centro atžvilgiu buvo lygus nuliui) ir su1,5g pagreičiu greitėja iki pastovaus greičio (Žemės atžvilgiu), lygaus 20 000 m · s^{-1}.

(i) Kiek laiko truks greitėjimo procesas?

(ii) Kokį atstumą nuskries kosminis laivas per tą laiką?

(iii) Kiek užtruktų šio laivo kelionė į Marsą?

Atstumas keliu tarp Londono ir Edinburgo = 600 km
Šviesos greitis c = 3 × 10^8 m · s^{-1}
Atstumas nuo Žemės iki Kentauro Proksimos = 4,3 šviesmečiai
Kelio tarp Žemės ir Marso ilgis = 5,0 × 10^8 m.

11 Prieš pradedant stabdyti automobilis judėjo 25 m · s^{-1} greičiu. Sustojo per 12 s.

a) Įrodykite, kad jo pagreitis lygus –2,1 m · s^{-2}.

b) Kokį atstumą jis nuvažiavo nuo stabdymo pradžios?

12 Tuo metu, kai vairuotojas pastebėjo, kad prieš jo automobilį į gatvę išbėgo vaikas ir pargriuvo, automobilis važiavo maksimaliu mieste leistinu greičiu 13 m · s^{-1}. Vairuotojo reakcijos laikas (laikas, per kurį jis sureaguoja į situaciją) yra 0,4 s, o nuspaudus stabdžius automobilis lėtėja su pastoviu 2,6 m · s^{-2} pagreičiu. Automobilis sustojo vos keleto centimetrų atstumu iki vaiko. Kiek metrų iki automobilio buvo vaikas, kai vairuotojas jį pastebėjo?

13 Pažiūrėkite į pavyzdį 20 puslapyje.

a) Ar gali vidutinis greitis kelionėje pirmyn ir atgal būti lygus 4 km · h^{-1}, jei upės tėkmės ir irklavimo greičiai yra tokie kaip nurodyta? Patikrinkite dviejose skirtingose distancijose.

b) Įrodykite a) atsakymą algebriškai.

14 Du lėktuvai artėdami skrenda tiesiai vienas priešais kitą. Vieno greitis lygus 200 km · h^{-1}, kito – 180 km · h^{-1}. Koks jų santykinis greitis?

15 Jachta „Žydroji žvaigždė“ plaukia iškėlusi bures, o potvynio srovė neša ją 2.K15 paveiksle parodyta kryptimi 3 mazgų (jūrinė mylia per valandą) greičiu. Jachtos greitis vandens atžvilgiu yra 6 mazgai. Kokia kryptimi ir kokiu greičiu judės jachta nejudančio plūduro A atžvilgiu?

2.K15 pav.

2, 3 ir 4 SKYRIŲ SCHEMĄ
žr. 81 puslapyje.

Užduotis

JUDĖJIMO NAGRINĖJIMAS NAUDOJANTIS DINAMINE DUOMENŲ LENTELE

Daugelyje fizikinių situacijų dinaminėmis duomenų lentelėmis galima pasinaudoti norint atsakyti į klausimus: „Kas įvyks, jeigu?“ Su jomis galima atlikti gana sudėtingus matematinius veiksmus. Tai naudinga norint patikrinti, kas atsitiks pakeitus vieną faktorių kitu; jas naudojant išvengiama daugybės pasikartojančių vienodų skaičiavimų ir (arba) naujų grafikų braižymo.

Aptarsime taikymą, kuris padės jums įgyti ar patobulinti naudingą tyrimo priemonę, taip pat įsigilinti į fiziką. Tam nereikia įrodinėti kokias nors matematines (analitines) formules – tiesiog panaudosime paprasčiausius **greičio** (t. y. judėjimo spartos tam tikra kryptimi) ir **pagreičio** apibrėžimus.

Skirtingų kompiuterinių programų šeimų naudojimosi duomenų lentelėmis detalės šiek tiek skirtingos. Jei čia pateiktos instrukcijos netinka ar neturi prasmės, paprašykite padėti geriau susipažinusio su konkrečia programa draugo.

Atkreipkite dėmesį, kad šioje Užduotyje kintamųjų žymenys pateikiami ne kaip įprasta – t. y. kursyvu išskirtomis raidėmis, o taip, kaip jie pateikti lentelėje. Mažas dydžio pokytis, paprastai žymimas Δ, čia pažymėtas D.

Pasiruošimas skaičiavimams

Atidarykite duomenų lentelės puslapį.
Stenkitės viską išdėstyti taip, kaip pavaizduota 2.U1 pav. Pradėkite nuo antraščių. Pradėkite ląstelėje A1 ir surinkite užrašą

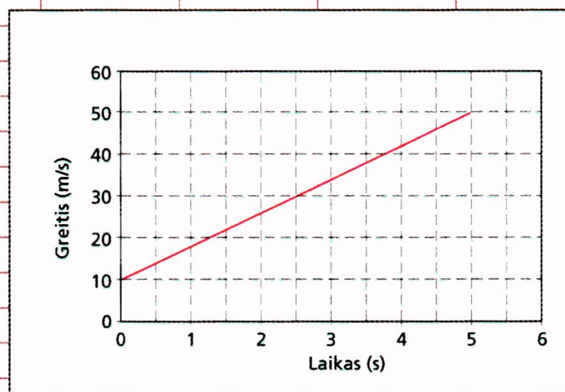
GREITĖJANTIS JUDĖJIMAS

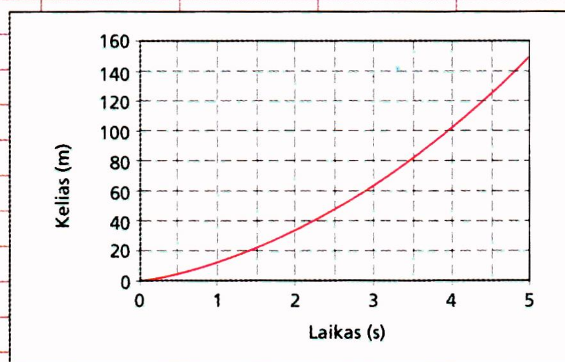
Kaip parodyta 2.U1 pav., antraštei skirtos trys ląstelės. Tiesiog tam, kad gražiau atrodytų, praleiskite keletą tuščių ląstelių, pereikite į ląstelę A4 ir įrašykite:

Pradinis greitis V1 =

2.U1 pav.

A	A	B	C	D	E	F	G	H
1	GREITĖJANTIS JUDĖJIMAS							
2								
3								
4	Pradinis greitis V1 =		10	m/s				
5	Pagreitis a =		8	m/s ^2				
6	Žingsnis,	Dt =	0,1	s				
7								
8	Laikas	Greitis	Kelias					
9	0	10	0					
10	0,1	10,8	1,04					
11	0,2	11,6	2,16					
12	0,3	12,4	3,36					
13	0,4	13,2	4,64					
14	0,5	14	6					
15	0,6	14,8	7,44					
16	0,7	15,6	8,96					
17	0,8	16,4	10,56					
18	0,9	17,2	12,24					
19	1	18	14					
20	1,1	18,8	15,84					
21	1,2	19,6	17,76					
22	1,3	20,4	19,76					
23	1,4	21,2	21,84					
24	1,5	22	24					
25	1,6	22,8	26,24					
26	1,7	23,6	28,56					
27	1,8	24,4	30,96					
28	1,9	25,2	33,44					
29	2	26	36					
30	2,1	26,8	38,64					
31	2,2	27,6	41,36					





Po to įrašykite į ląstelę A5:
Pagreitis a =
ir į ląstelę A6:
Žingsnis Dt =

Pažymėkite vienetus ląstelėse:	D4	D5	D6
	m/s	m/s^2	s
Užrašykite stulpelių pavadinimus:	A8	B8	C8
	Laikas	Greitis	Kelias

Algoritmas

Savo nuožiūra pasirinkite pradinį greitį ir pagreitį, ir tuoj pat duomenų lentelėje pamatysite greitį bet kuriuo laiko momentu, taip pat visą kelią, nueitą per tą laiką. Skaičiavimus programa atliks visuose taškuose, kurių laiko intervalus nurodys pasirinktas žingsnis Dt = .

Pradžiai pasirinkite Dt = 0,1 s. Taigi ląstelėje C6 įrašykite:
0,1
Dabar užpildykite *laiko* stulpelį skaičiais, prasidedančiais nuliu ir didėjančiais kas 0,1. Tai geriausia padaryti naudojantis formule. Ląstelėje A9 įrašykite:
0
Ląstelėje A10 įterpkite formulę:
= A9 + $C$6
Tada NUKOPIJUOKITE šią formulę į visas ląsteles nuo A11 iki A59. Jei nežinote, kaip tai padaryti, pasinaudokite **Pagalba** arba pasiskaitykite programos aprašyme.
Pasirinkite pagreičio vertę, pavyzdžiui, ląstelėje C5 įrašykite:
8
Pasirinkite pradinio greičio vertę. Pavyzdžiui, ląstelėje C4 įrašykite:
10
Įrašykite į ląstelę B9 pasirinktą (keičiamą) V1 vertę. Įrašykite:
= $C$4
Simbolis $ yra sutartinis ženklas duomenų lentelėje, kuriuo susiejama skaičiuojamoji vertė su konkrečia ląstele. Ląstelėje C9 įrašykite nulį:
0

Greičio skaičiavimas

Duomenų lentelė pateiks greitį, apskaičiuotą pagal apibrėžimą: **pagreitis yra lygus greičio pokyčiui per laiko vienetą.** Taigi galime tikėtis, kad greičio pokytis per trumpą laiko intervalą Dt yra tiesiog lygus:
pagreitis x Dt
Ląstelėje B10 įrašykite algoritmą, naudodamiesi analogiškais žymenimis kaip ir pirma:
= B9 + ($C$5 * $C$6)
Tai reiškia: pridėti ląstelėje B9 įrašytą vertę (pradinio greičio) prie greičio pokyčio (pagreitis x laiko prieaugis).

Kai baigsite įrašą ir paspausite OK mygtuką (arba jo ekvivalentą), ląstelėje B10 turėtų atsirasti vertė 10,8.

Dabar jums reikia NUKOPIJUOTI formulę žemyn iki stulpelio galo (ląstelės B59). Padarykite tai. KOPIJAVIMO funkcija kaskart automatiškai pakeis ląstelės įrašą, pridėdama greičio prieaugį (aDt) prie kiekvienos naujai apskaičiuotos greičio vertės. Peržiūrėkite keletą ląstelių šiame stulpelyje ir išsiaiškinkite, ką tai reiškia. Jei visa tai atlikote teisingai, turėtumėte gauti tokias vertes kaip 2.U1 pav.

Dabar pasinaudokite grafinio atvaizdavimo funkcija ir nupieškite greičio priklausomybę nuo laiko (žr. 2.U1 pav.). Įsitikinkite, kad programai nurodyta piešti „XY" grafiką. Įterpkite grafiką patogioje duomenų lentelės vietoje, kad būtų patogu stebėti, kas vyks, kai keisite parametrus. Pavyzdžiui, pagreičio vertę 8 m · s^{-2} galite pakeisti kita verte. Pabandykite ir neigiamas vertes.

Kelias ir kelio priklausomybės nuo laiko grafikas

Prieš tęsdami darbą grįžkite prie pradinių verčių, kurios parodytos 2.U1 paveiksle.

Papildomas kelias, nueitas per trumpą laiko intervalą Dt, lygus:

vidutinis greitis tame laiko intervale × intervalas Dt

Vidutinis greitis sekančiame laiko intervale (atitinkančiame eilutę nuo A10 iki C10) skaičiuojamas taip:
1/2 × [greitis ankstesnio intervalo pabaigoje (ląstelėje B9 – 10 m/s)]
PLIUS
greitis šio intervalo pabaigoje (ląstelėje B10 – 10,8 m/s).
Kelio prieaugis gaunamas padauginus šią greičio vidurkio vertę iš Dt. Norint rasti visą nueitą kelią, reikia pridėti prieaugį prie anksčiau apskaičiuoto kelio (kuris, žinoma, visą laiką yra įrašytas ankstesnėje ląstelėje).
Taigi ląstelėje C10 įrašykite:
= C9 + 0,5*(B9 + B10)*$C$6
Pasitikrinkite, ar ląstelėje C10 atsirado vertė 1,04. Tada, kaip ir anksčiau, NUKOPIJUOKITE šią formulę ir užpildykite stulpelį (nuo C10 iki C59).

Tada nupieškite grafiką.

Kaip ir anksčiau, patyrinėkite, kaip pasireikš pradinių verčių ląstelėse C4, C5 ir C6 pakeitimas.

Atlikę šį darbą galite atsakyti į tokius klausimus:

1

a) Paaiškinkite kelio priklausomybės nuo laiko eigą, kai pagreitis yra **(i)** teigiamas, **(ii)** neigiamas.
b) Paaiškinkite, kodėl kelio priklausomybės nuo laiko grafikas nėra tiesė.
c) Paaiškinkite skirtumus tarp kelio priklausomybės nuo laiko grafikų, kai pagreitis yra **(i)** teigiamas, **(ii)** neigiamas.

2 Naudodamiesi duomenų lentele gaukite tokių dydžių vertes:
a) Greičio, praėjus 60 s nuo judėjimo pradžios, kai pradinis greitis lygus nuliui, o pagreitis lygus 2,5 m · s^{-2}.
b) Kelio, nueito per pirmąsias 30 s, **a)** aprašytu atveju.
c) Laiko, kurio prireiks nuvažiuoti 300 m kelią 1,5 m · s^{-2} pagreičiu iš vietos pajudėjusiai transporto priemonei.

3 Niutono Visata



Vokiečių šuolininkė į tolį Heike Drechsler šuolio metu

ŠUOLIŲ Į TOLĮ SĖKMĖ priklauso nuo tokių savybių kaip geras kūno sudėjimas, atkaklios treniruotės ir įgimti sugebėjimai. Ir vis dėlto šuolio nuotolis daugiausia priklauso nuo to, kaip šuolininkas sugeba laikytis ore kiek galima ilgiau, judėdamas į priekį kiek galima greičiau.

Geras šuolininkas į tolį atsispiria ties šuoliaduobės riba maždaug 10 m · s^{-1} greičiu. Maksimalus nuotolis pasiekiamas, kai šis greitis yra po lygiai skirstomas judėjimui į priekį ir į viršų, t. y. kai pašokama 45° kampu žemės atžvilgiu.

Kad atsispirtų būtent tokiu 45° kampu, šuolininkas turi kiek galėdamas šokti aukštyn ir tuo pat metu kaip galima greičiau skrieti į priekį. Geras šuolininkas pakelia savo kūno masės centrą maždaug į 1 metro aukštį. (Vyrai jį pakelia į 1,2 m; moterys maždaug į 1,0 m.)

Remdamiesi gravitacijos žiniomis galime teigti, jog tam, kad pakiltume į 1,2 m aukštį ir vėl nutūptume, turėtume išbūti ore apie 1 s. Jei greitis lygus 10 m · s^{-1}, tai reiškia, kad kūnas turėtų nuskrieti į priekį 10 m nuotolį, t. y. maksimalus įmanomas šuolio į tolį nuotolis būtų 10 m. Pasaulio rekordas šiuo metu yra lygus 8,96 m (Ivano Pedroso iš Kubos, 1995 liepos 29 d.), taigi dar yra kur pasistengti!

Įdomu, kad 8,90 m šuolio į tolį rekordas, kurį aukštikalnių sąlygomis Mechike 1968 metais pasiekė Bobas Beamanas, labai smarkiai viršijo ankstesnį rekordą ir buvo nepralenkiamas ištisus 23 metus. Matyt, ir dabartinis rekordas bus pagerintas aukštikalnių sąlygomis, o priartėti prie teorinio maksimumo yra be galo sunku.

Šio skyriaus sąvokos

Stengiantis suprasti kūnų judėjimą Žemėje, pačios svarbiausios yra **jėgos** ir **gravitacijos** sąvokos. Kūnai juda tik tuomet, kai juos veikia jėga. Gravitacijos jėga veikia bet kurį kūną. Pavyzdžiui, kai sviedžiate aukštyn kamuolį, jūs paveikiate jį jėga, verčiančia judėti į viršų. O gravitacijos jėga priverčia jį kristi žemyn.

Prieš tris šimtus metų, iki Izaoko Niutono laikų, šių sąvokų mokslininkai dar gerai nesuprato. Šiame skyriuje paaiškinsime Niutono teorijas, o 4 skyriuje panagrinėsime keletą pavyzdžių, kaip išsiaiškinę jėgų veikimą mokslininkai ir inžinieriai galėjo keisti pasaulį, kuriame gyvename.

1 NIUTONO DĖSNIAI

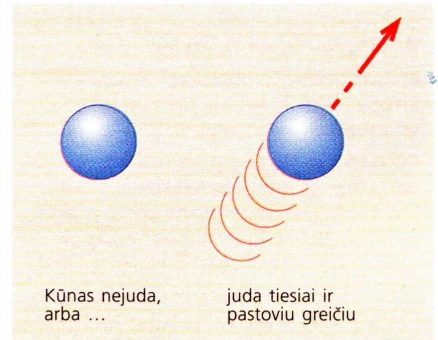
Tarkime, jūs grindimis paridenote kamuolį. Netrukus jis ėmė lėtėti ir pagaliau sustojo. Nuo pat Aristotelio epochos (daugiau kaip prieš 300 m. iki Kr.) iki Niutono laikų mokslininkai manė, kad tai yra natūrali kūnų judėjimo savybė. Niutonas išaiškino, kad šis du tūkstančius metų vyravęs įsitikinimas buvo neteisingas. Jis įrodė, kad kamuolį veikia jėga – **trinties** jėga – kuri jį ir stabdo. Jei ši jėga neveiktų, kamuolys riedėtų nelėtėdamas.

Pirmiausia Niutonas išnagrinėjo įsivaizduojamą visatą, kurioje yra vienintelis kūnas, kaip parodyta 3.1 pav. Šis kūnas arba nejudės (bus rimties būsenoje), arba, jei judės, tai visą laiką tiesia linija ir pastoviu greičiu.

Būtent ši paprasta mintis padėjo Niutonui atskleisti pagrindinius fizikos dėsnius. Ji apibendrinta **pirmajame Niutono judėjimo dėsnyje** (žr. toliau išplėstinį intarpą). Tačiau reali visata, žinoma, nėra tokia paprasta. Jei ji tokia būtų, tai kaip nustatytume, ar kūnas judėjo, ar ne? Ir ar jis judėjo tiesia linija? Be to, kas būtume tie „mes" ir kur turėtume būti, kad galėtume užduoti šiuos klausimus ir suvokti atsakymų prasmę? Tam, kad atsakytumėte į šiuos klausimus, jums teks sekti Alberto Einšteino pėdomis (žr. 25 skyrių 2-oje knygos dalyje).

Tačiau kol kas grįžkime nuo šių klausimų prie Niutono. Jis pažengė toliau įnešdamas į šią menamą visatą šį tą naujo: **jėgą.** Jei kūnas kokiu nors būdu keičia savo judėjimą, t. y. pradeda judėti, greitėja ar lėtėja, arba keičia judėjimo kryptį, tai reiškia, kad **jį veikia jėga.** Šis jėgos sukeliamas poveikis nusako, kas Niutono pasaulyje *yra* jėga. Pastaroji sąvoka ir užbaigia pirmąjį dėsnį.

Tačiau iš kur atsiranda ši jėga? Niutono pirminėje visatoje turi būti dar kažkas, „jėgą sukeliantis" kūnas ar tam tikro pavidalo sistema. Iki šiol viskas atrodė akivaizdu, bent jau mums. Tačiau Niutonas žengė dar toliau ir pareiškė visiškai netikėtą mintį. Jis teigė, kad, jei pirmąjį kūną veikia jėga, tai antrąjį, „jėgą sukeliantį" kūną irgi turi veikti jėga. Jėgos gali egzistuoti tik poromis („jėga" ir „antijėga").



3.1 pav. **Įsivaizduojama (beveik) tuščia Niutono visata**

?

A Tarkim, jūs per aikštę sviedėte kamuolį. Nubraižykite skriejimo schemą iki pusiaukelės. Rodyklėmis su atitinkamais užrašais pažymėkite visas jėgas, veikiančias tą kūną. Trumpai paaiškinkite jūsų nurodytų jėgos ar jėgų prigimtį ar priežastį.

■ Žr. 3 klausimą.

Niutono judėjimo dėsniai

Niutonas suformulavo tris judėjimo dėsnius. Pirmasis dėsnis apibrėžia jėgą. Antrajame susieta keletas sąvokų, įvedamos tokios sąvokos kaip **judesio kiekis** (t. y. čia jau paisoma **masės**) ir judesio kiekio **kitimo sparta.** Šis dėsnis įgalina išmatuoti jėgos dydį. Trečiasis dėsnis atrodo labai paprastas, tačiau jo prasmė irgi yra labai gili, nes jame slypi galbūt vienas iš fundamentaliausių dėsnių visoje fizikoje – **judesio kiekio tvermės** dėsnis.

Pirmasis dėsnis
Rimties būsenoje esantis kūnas išlieka rimties būsenoje, o tiesiai judantis kūnas ir toliau juda ta pačia kryptimi ir tuo pačiu greičiu, kol jų nepaveikia išorinė (nesukompensuota) jėga.

Antrasis dėsnis
Veikiant jėgai judančio kūno greitis ir (arba) judėjimo kryptis pakinta. Dėl jėgos kintant kūno judesio kiekiui, judesio kiekio kitimo sparta yra proporcinga tą pokytį sukėlusiai jėgai, o pokyčio kryptis sutampa su jėgos kryptimi.

Iš antrojo dėsnio išplaukia lygtys:

$$F = ma$$

ir $$Ft = m\Delta P$$ (žr. 34 psl.)

Trečiasis dėsnis
Jėgos atsiranda poromis: jei kūną veikia jėga, tai turi būti kitas kūnas, kurį irgi veikia jėga. Šios jėgos yra lygaus dydžio, bet veikia priešingomis kryptimis.



B Ant stalo gulinti knyga nejuda.

a) Nubraižykite jėgų, veikiančių knygą, dydį ir kryptį atitinkančią schemą.

b) Viena iš šių jėgų susijusi su visuotine trauka (gravitacija) ir, kaip ir visos jėgos, turi turėti porą. Kokia kita tos poros jėga ir kokį kūną ji veikia?

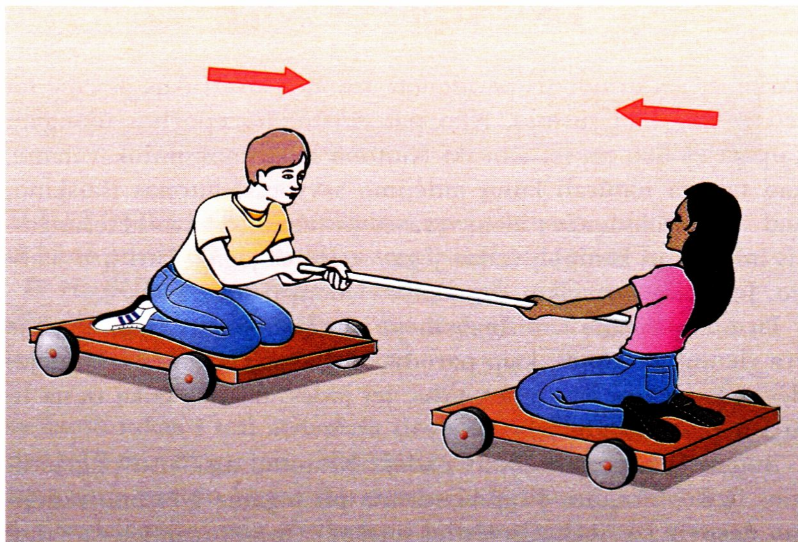
C Didelę dėžę mėginama traukti prie jos pririšta virve. Akivaizdu, kad dėžę veikia jėga, bet matome, jog dėžė visai nejuda. Kokias išvadas galite padaryti iš šio stebėjimo?

D Kokios jėgų poros veikia šiose situacijose?

a) Teniso rakete smūgiuojama į kamuoliuką.

b) Sviedinys paleistas iš rankų, bet dar nepasiekė grindų.

c) Jūs pradedate judėti – žengiate žingsnį į priekį.



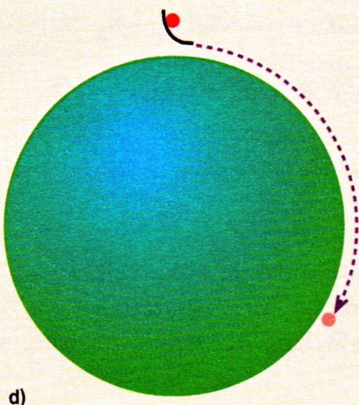
3.2 pav. **Trečiasis Niutono dėsnis. Vienam stumiant arba traukiant juda abu**

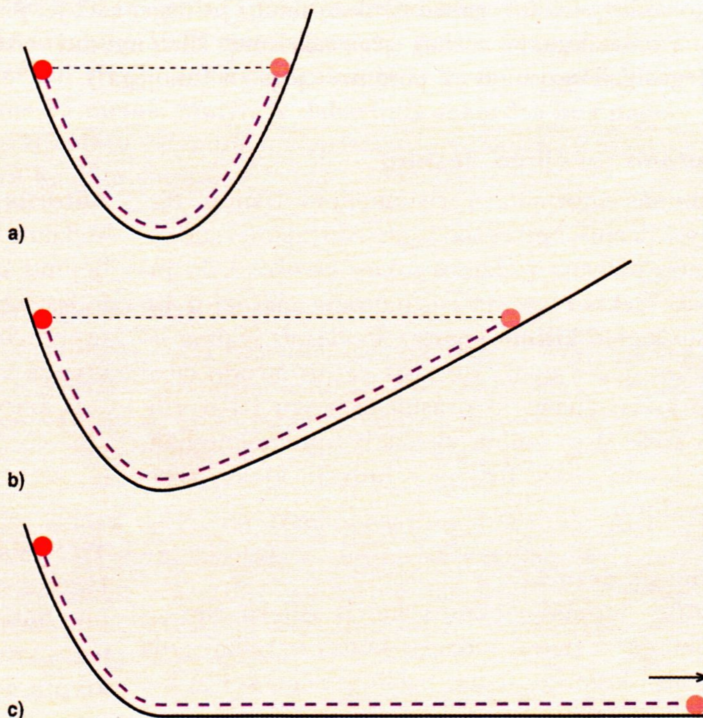
Abi poros jėgos turi būti lygaus dydžio, bet veikti priešingomis kryptimis (žr. 3.2 pav.). Šis teiginys yra trečiojo judėjimo dėsnio pagrindas.

Niutono įsivaizduojamoji visata nebuvo mokslinės fantastikos vizija. Ji buvo paremta stebėjimais, atliktais Niutono ir daugelio kitų mokslininkų (žr., pavyzdžiui, Galilėjaus idėjas 3.3 pav.). Teiginio esmė tarsi ir nesudėtinga, tačiau turėtume suprasti, kad tais laikais matuoti judėjimo parametrus buvo kur kas sudėtingiau nei dabar. Tai buvo pasaulis be degalais varomų mašinų, kurios varo automobilius ir traukinius bei pakelia nuo žemės lėktuvus. Nebuvo spidometrų, o atstumo ir laiko matavimai, mūsų požiūriu, buvo labai netikslūs.

Žr. 2 ir 4 klausimus. ■

3.3 pav. **Judėjimą tyrinėjo ir kitas mokslininkas – G. Galilėjus (1564–1642). Paveiksle parodyti jo „mintiniai eksperimentai" nagrinėja kamuoliuką ir šlaitą, kai tarp jų visiškai neveikia trinties jėgos. a) ir b) padėtyse kamuoliukas rieda žemyn ir vėl aukštyn į kitą šlaitą iki tokio pat aukščio. c) padėtyje kamuoliukas niekada nesustotų. d) – Žemė apvali, todėl Galilėjui atrodė, kad „jėgų neveikiamas" judėjimas savaime yra judėjimas apskritimu. Niutonas nesutiko su šiuo teiginiu ir įrodė, kad jis klaidingas.**





Planetų panaudojimas matavimams

Planetų judėjimas atidžiai tyrinėjamas jau tūkstančius metų. Jūrininkams buvo gyvybiškai svarbu suprasti planetų ir žvaigždžių judėjimą ir žinoti jų padėtis, ypač Niutono laikais, sparčiai vystantis jūrų prekybai.

Kadangi planetos juda „tuščioje" erdvėje, praktiškai be trinties, astronomų išmatuoti atstumai ir trukmės buvo tiksliausi dydžiai, kuriais Niutonas galėjo pasinaudoti. Iš tikrųjų visi laiko matavimai pagrįsti kasdien ir kasmet pasikartojančiu Žemės judėjimu aplink Saulę ir Mėnulio aplink Žemę.

Niutonas pasižymėjo išsprendęs uždavinius, kuriuos kėlė šių astronominių kūnų judėjimas. Jis įvedė fundamentalias jėgos, masės ir judesio kiekio sąvokas ir apibrėžė jas trimis judėjimo dėsniais. Be to, jis paskelbė visuotinės traukos (gravitacijos) dėsnį, kuriuo paaiškinamas Mėnulio ir planetų judėjimas. Jis taip pat plėtojo naują matematikos šaką – **diferencialinį ir integralinį skaičiavimą,** labai jam palengvinusį skaičiavimus.

Septynioliktajame amžiuje Niutonas buvo ne vienintelis mokslininkas. Jis ir jo kolegos „natūrfilosofai", kaip tada vadino mokslininkus, pelnė pagarbą tuo, kad pradėjo pirmąją **mokslinę revoliuciją.** Jie teigė, kad teorijos neturi vertės, jei nesiderina su stebėjimais, su tuo, kas iš tiesų vyksta. Fizikoje tai reiškė, kad kūnų judėjimo teorijos turėjo pateikti matematines formules, kurios galėtų tiksliai aprašyti – ir numatyti – šį judėjimą. Dabar panagrinėkime fundamentalias sąvokas, kurias reikia aiškiai suvokti, kad galėtume suprasti judėjimą, pavyzdžiui, tokių kūnų kaip planetos, arba artimiau pažįstamų – tokių kaip laivai ir arkliai.

2 JUDESIO KIEKIS

Visų pirma kaip galima „judėjimą" aprašyti kiekybiškai, t. y. priskirti jam skaitines vertes? Kokius judėjimo parametrus galima numatyti?

Atsakyti į šiuos klausimus galima naudojantis Niutono pasiūlyta **judesio kiekio** sąvoka. Niutonas suprato, kad ši sąvoka susijusi su dviem kitomis: judėjimo sparta tam tikra kryptimi (t. y. **greičiu**) ir mase.

Judesio kiekis (P) yra lygus **masės** ir **greičio** sandaugai, t. y.

$$P = mv$$

Vektorius yra dydis, apibrėžiamas skaitine verte ir kryptimi. Greitis yra vektorius, todėl judesio kiekis irgi vektorius. Jo kryptis sutampa su judančio kūno greičio kryptimi.

Pagal pirmąjį Niutono dėsnį jėga apibrėžiama paprastai ir be kiekybinių vertinimų (31 psl.). Antrasis Niutono dėsnis išplečia pirmąjį bei aprašo sąryšį tarp jėgos ir jos poveikio į kūno judėjimą. Jėga keičia kūno judėjimą, todėl judesio kiekio **kitimo sparta** yra proporcinga jėgai. Jėga lygi judesio kiekio kitimo spartai:

$$\textbf{Jėga} = \frac{\textbf{judesio kiekio pokytis}}{\textbf{laikas}}$$

$$F = \frac{\Delta P}{t} \ \textbf{(niutonais)},$$

kur simbolis ΔP žymi judesio kiekio pokytį.



E Teniso kamuoliuko masė lygi 0,07 kg. Jis atsimuša į raketę skriedamas 20 m · s^{-1} greičiu, o nuo jos atšoka tiksliai priešinga kryptimi 10 m · s^{-1} greičiu. Kamuoliuko sąlytis su rakete truko 0,15 s.

a) Koks buvo jo judesio kiekio pokytis?

b) Kokį impulsą įgavo kamuoliukas?

c) Kokia vidutinė jėga veikė: **i)** raketę, **ii)** kamuoliuką?

F 25 N jėga 0,2 sekundės veikia kūną, turintį 30 kg · m · s^{-1} judesio kiekį.

a) Apskaičiuokite judesio kiekio pokytį.

b) Ar gali jėga veikti tokiu būdu, kad kūno greitis liktų toks pat? Paaiškinkite.

Žr. 16, 18 ir 19 klausimus.

Šią formulę galima pertvarkyti į praktiškai patogesnę dviem būdais.

Impulsas

Pertvarkę formulę gauname:

$$Ft = \Delta P$$

Dydis Ft, jėgos ir jos veikimo trukmės sandauga yra vadinamas jėgos **impulsu.** Taigi:

Jėgos impulsas = judesio kiekio pokytis

Ši sąvoka ypač patogi, kai jėga kinta, kai ji veikia trumpą laiką, arba kai jėgą ir laiką yra sunku atskirai išmatuoti. Pavyzdžiui, taip būna smūgių metu. Daugiau apie šį požiūrį į judėjimo pokyčius sužinosite 4 skyriuje.

Judesio kiekio pokytis veikiant pastoviai jėgai

Kai susiduriama su „pavyzdingomis“ jėgomis, kurios išlieka pastovios visame laiko intervale t, galima apibrėžti pradinį greitį v_0 ir galinį greitį v_1 (žr. 2 skyrių, 14 psl.); tada judesio kiekio pokytis:

$$\Delta P = \frac{mv_1 - mv_0}{t}$$

Iš čia:

$$F = \frac{mv_1 - mv_0}{t}$$

$$= m\frac{v_1 - v_0}{t}$$

$$F = ma$$

Tai labai gerai žinomas sąryšis:

Jėga = masė × pagreitis

Atkreipkite dėmesį, kad šioje formulėje masė m laikoma nekintamu dydžiu.

PAVYZDYS

K Kylančio lėktuvo varikliai išvysto 120 kN jėgą. Lėktuvo masė – 40 tonų (1 tona = 1000 kg). Apskaičiuokite: **a)** variklių sukeliamą pagreitį, **b)** minimalų pakilimo kelio ilgį, jei greitis, reikalingas tam, kad lėktuvas pakiltų, yra lygus 80 m · s^{-1}.

A

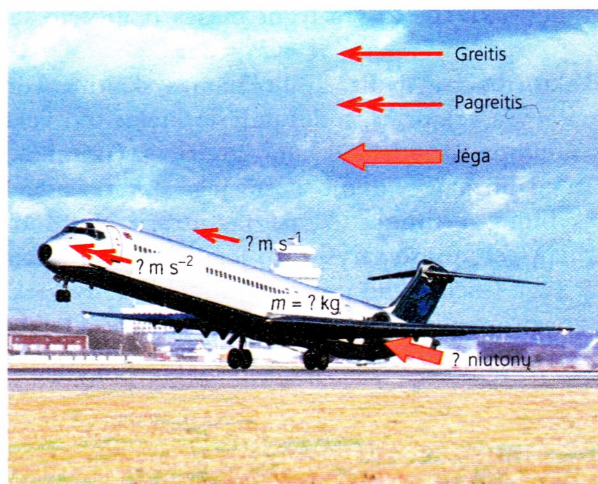
a) Pagal formulę $F = ma$:

$a = F/m = (1,2 \times 10^5)/(4 \times 10^4) = 3$ m · s^{-2}

b) Naudojamės judėjimo lygtimi $v_1^2 = v_0^2 + 2ax$.

Ją pertvarkius ir žinant, kad $v_0 = 0$:

$$x = \frac{v_1^2}{2a} = \frac{3600}{6} = 600 \text{ m}$$



3.4 pav. **Kylantis lėktuvas**

Masės pokytis irgi veikia impulsą

Formulėje $F = ma$ (arba $F = m\,dv/dt$) masė yra pastovus dydis. Tačiau dažnai esti kitaip – pavyzdžiui, raketų judėjime jėga atsiranda dėl to, kad iš raketos išmetama medžiaga. Daugiau apie tai sužinosite 4 skyriuje. Be to, kaip įrodyta reliatyvumo teorijos, kūnų, judančių labai dideliais greičiais, masė priklauso nuo greičio (žr. 25 ir 26 skyrius 2-oje knygos dalyje). Taigi pasitelkus diferencialinį skaičiavimą galima antrojo Niutono dėsnio matematinę išraišką užrašyti tiksliau:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dP}{dt}$$

G Kūną veikia 12 N jėga. Apskaičiuokite kūno masę, jei ta jėga per 4 s pakeičia jo greitį nuo 5 m · s^{-1} iki 25 m · s^{-1} (kryptis išlieka tokia, kokia buvo).

3 INERCINĖ MASĖ IR GRAVITACINĖ MASĖ

Niutonui buvo sunku apibrėžti „masę“ kaip nors kitaip nei „medžiagos kiekis“. Tai, žinoma, buvo ne tas pat kaip **svoris** (žr. 38 psl.)! Tada Niutonas apibrėžė masę dviem būdais. Jo pirmasis apibrėžimas buvo toks:

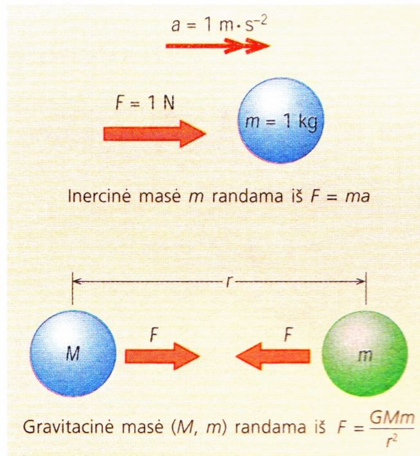
Masė nusako kūno savybę priešintis greitėjimui judant.

Tai reiškia, kad kūno masę galime nustatyti stebėdami, koks bus jo pagreitis paveikus žinoma jėga, ir taikydami formulę $m = F/a$. Žodis **inercija** reiškia nejudrumą (lot. *inertia*), todėl ši masės rūšis yra vadinama **inercine mase.**

Tačiau Niutonas taip pat sukūrė visiškai naują teoriją, visuotinės traukos **(gravitacijos) teoriją.** Pagal šią teoriją:

Kiekvienas turintis masę kūnas sukelia traukos jėgą, kuria veikia kitus masę turinčius kūnus.

Taigi masę galima nustatyti matuojant tarp dviejų kūnų veikiančios jėgų poros dydį. Kaip tik tai iš esmės ir darome, kai matuojame kūną veikiančią visuotinės traukos jėgą jį sverdami, tarkim, spyruoklinėmis svarstyklėmis. Tokiais matavimais nustatyta masė yra vadinama **gravitacine mase.**



3.5 pav. **Inercinė ir gravitacinė masė. Ar tai tas pat?**

■ Žr. 5 klausimą.

Ar šios dvi masės yra ekvivalenčios?

Pagal Niutono fiziką šių dviejų tipų matavimo rezultatai nebūtinai turi sutapti, tačiau jie visada sutampa. Eksperimentiškai patikrinta, kad jie atitinka bent jau $1/10^{12}$ tikslumu. Galų gale masė yra masė, ar ne? Tačiau būtent šį atitikimą turėjo patikrinti A. Einšteinas, kai kūrė savo bendrąją reliatyvumo teoriją.

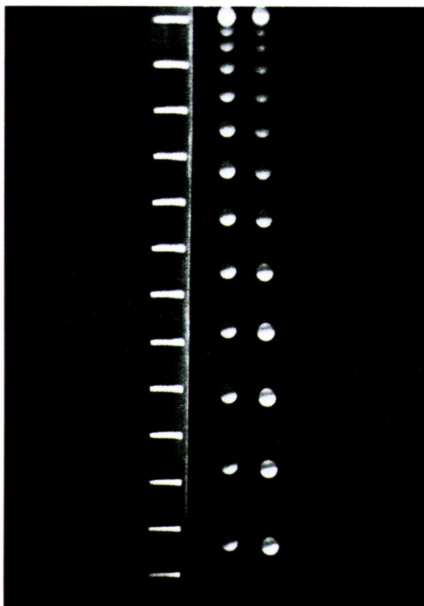
H Kūną veikiančių jėgų atstojamoji yra lygi 15 N ir suteikia jam 5 m · s^{-2} pagreitį.

a) Kokia kūno masė?

b) Kokia jėga turėtų veikti, kad kūnas įgytų 9,8 m · s^{-2} pagreitį?

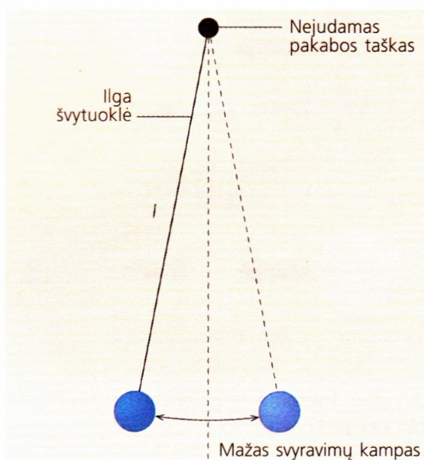
I Mūsų Visata plečiasi. Tai reiškia, kad ją sudarančios milžiniškos masės (pavyzdžiui, galaktikos) tolsta viena nuo kitos. Viena iš teorijų aiškina, jog šis plitimas gali vykti iš dalies dėl to, kad kūnų gravitacinės masės, nors ir labai nežymiai, vis dėlto skiriasi nuo inercinių masių. Kuri iš masių turėtų būti didesnė, kad Visata imtų plėstis? Atsakymą pagrįskite.

J Sugalvokite bandymą, kuriuo patikrintumėte, ar gravitacinė ir inercinė masės tapačios, ir trumpai aprašykite jo esmę.



3.6 pav. **Visi vakuume krintantys kūnai greitėja ta pačia sparta. Kairėje – golfo kamuoliukas, dešinėje – stalo teniso kamuoliukas**

Žr. 6 klausimą.



3.7 pav. **Matematinė švytuoklė. Periodas *T* yra lygus laikui, per kurį švytuoklės pasvaras nukrypsta nuo pusiausvyros padėties ir grįžta atgal į pradinę padėtį. Norint gauti tikslią vertę reikia išmatuoti bent 20-ies svyravimų trukmę**

?

K Matematinė švytuoklė kadaise buvo pati tiksliausia priemonė laikrodžiams tikrinti.

a) Apskaičiuokite, kokio ilgio turi būti matematinė švytuoklė, kad jos svyravimų periodas būtų tiksliai lygus 1 sekundei.

b) Aštuonioliktojo amžiaus jūrininkams reikėjo labai tikslių laikrodžių laivo padėčiai jūroje nustatyti. Kodėl švytuokliniai laikrodžiai nelabai tiko šiam tikslui?

4 VISUOTINĖS TRAUKOS (GRAVITACIJOS) JĖGA IR LAISVOJO KRITIMO PAGREITIS

Niutonas suvokė, kad kūnai krinta žemyn dėl to, kad Žemė juos veikia tam tikra jėga – **gravitacijos jėga.** Šios jėgos veikiamas kūnas įgyja pagreitį, nukreiptą žemyn. Jau ir anksčiau buvo gerai žinoma, kad esant tinkamoms sąlygoms visi kūnai, nepriklausomai nuo jų masės, krinta su vienodu pagreičiu. Jis vadinamas **laisvojo kritimo pagreičiu.** Svarbiausioji sąlyga – kad kūnai kristų visiškai laisvai, be trinties ar kitų pasipriešinimo jėgų, lėtinančių kritimą. Krintant ore, mažo švininio rutuliuko pagreitis skirsis nuo lengvo popierinio gniužuliuko pagreičio, nes kūnai juda per sukeliančią pasipriešinimą aplinką – orą. Tačiau vakuume visų kūnų pagreitis yra vienodas. Paprastas laboratorinis eksperimentas rodo, kad laisvojo kritimo pagreitis apytiksliai lygus 9,8 m · s^{-2}. Ši vertė žymima simboliu *g*. Tikslesni eksperimentai rodo, kad skirtingose Žemės paviršiaus vietose *g* yra skirtingas. Kai kurios vertės pateiktos 3.1 lentelėje.

Lentelė 3.1 **Laisvojo kritimo pagreičio *g* vertės skirtingose Žemės paviršiaus vietose.**

Vietovė	Londonas	Kalkuta	Tokijas	Sidnėjus	Šiaurės polius
Laisvojo kritimo pagreitis (m · s^{-2})	9,812	9,788	9,798	9,797	9,832

Šis skirtumas atsiranda dėl keleto priežasčių:

- Žemė nėra visiškai taisyklingo rutulio formos, todėl skirtingos vietos jos paviršiuje yra nevienodai nutolusios nuo centro.
- Žemės plutos tankis yra nevienalytis, todėl skirtingose vietose Žemės masė gali būti skirtinga.
- Žemė sukasi apie savo ašį, todėl kai kurios Žemės rutulio vietos (pavyzdžiui, ekvatoriaus sritis) sukasi didesniu greičiu nei kitos.

Kaip dėl to pakinta laisvojo kritimo pagreitis, sužinosite toliau nagrinėdami šį skyrių.

Laisvojo kritimo pagreičio *g* matavimas

Norint tiksliai nustatyti *g*, naudojami metodai, pagrįsti svyruojančios švytuoklės periodo matavimais, kaip parodyta 3.7 pav. Matematinės švytuoklės periodą *T* aprašo formulė:

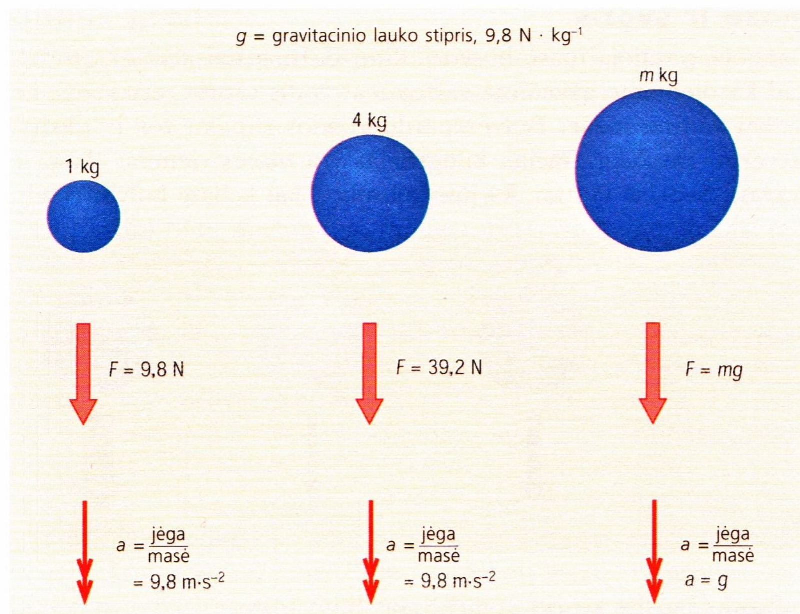
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

kur *l* yra švytuoklės ilgis. Daugiau apie matematinę švytuoklę sužinosite 115 puslapyje. Daugelyje (netgi aukštesnio lygio) skaičiavimų pakanka tokio tikslumo *g* vertės: 9,8 m · s^{-2}.

Kodėl visi kūnai krinta su tuo pačiu pagreičiu?

Kruopštūs eksperimentai rodo, kad masės *m* kūną veikianti gravitacijos jėga (dėl Žemės poveikio) suteikia tam kūnui pagreitį, kurio vertė *g* priklauso nuo geografinės vietos. Pagal antrąjį Niutono dėsnį jėga *F* yra tokia:

$$F = mg$$



3.8 pav. **Gravitaciniame lauke visi kūnai toje pačioje vietoje įgauna tą patį pagreitį**

Taigi toje pačioje Žemės paviršiaus vietoje g yra visada toks pat ir nepriklauso nuo kūno masės. Tai reiškia, kad F turi būti proporcingas m. Jei, pavyzdžiui, masė padvigubėja, turi padvigubėti ir jėga. (*Kodėl* gravitacija veikia tokiu būdu, savo bendrojoje reliatyvumo teorijoje paaiškina Einšteinas).

5 GRAVITACINIO LAUKO STIPRIS

Naudosime dydį **gravitacinio lauko stipris,** kad būtų lengviau aprašyti, kaip gravitacinis laukas veikia kūnus. Žemesnėse klasėse jūs susidūrėte su magnetinio ir elektrinio lauko sąvokomis ir jau žinote, kaip šios jėgos pasiskirsto erdvėje. Taip pat galime įsivaizduoti, kad erdvėje apie bet kurį kūną (pavyzdžiui, Žemę) susidaro **gravitacinis laukas.** Daugiau apie tai rašoma 4 skyriuje.

Gravitacinio lauko *stipris* – tai jėga, veikianti bet kokį kūną, tenkanti to kūno masės vienetui. Kaip jau išsiaiškinome, lauko stipris skaitine verte yra lygus laisvojo kritimo pagreičiui g. Taigi arti Žemės paviršiaus ši vertė yra apytiksliai lygi 9,8 niutonų kilogramui.

Pagal jėgos apibrėžimą:

■ Žr. 17 klausimą.

Masę veikianti gravitacijos jėga = masė × laisvo kritimo pagreitis

$$F = mg$$

Pagal gravitacinio lauko stiprio apibrėžimą:

$$\textbf{Gravitacinio lauko stipris} = \frac{\textbf{gravitacijos jėga}}{\textbf{masė}} = \frac{mg}{m} = g$$

Taigi jūs galite susidurti su g vertėmis $N \cdot kg^{-1}$ vienetais, kai g siejamas su gravitacinio lauko stipriu, arba $m \cdot s^{-2}$ vienetais, kai turima galvoje laisvojo kritimo pagreitis.

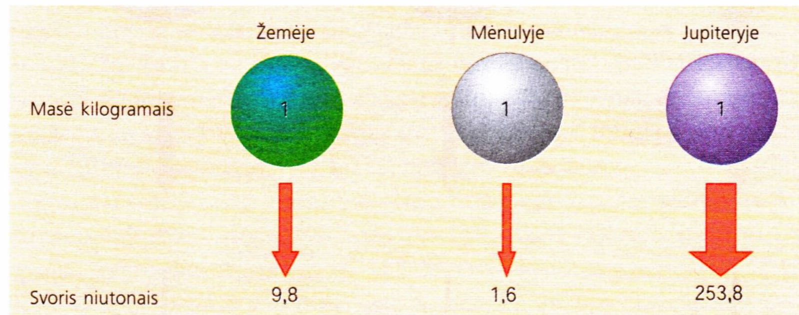
?

L Paaiškinkite, kodėl dydis g kartais pateikiamas kaip $9{,}8\ m \cdot s^{-2}$, o kartais kaip $9{,}8\ N \cdot kg^{-1}$.

M Gravitacinio lauko stipris Marso paviršiuje yra $3{,}8\ N \cdot kg^{-1}$. Per kiek laiko ten laisvai krisdamas 2 kg masės kūnas įgys $20\ m \cdot s^{-1}$ greitį?

Masė ir svoris

Daugelis painioja masę ir svorį. Taip dažniausiai atsitinka todėl, kad kasdieniame gyvenime vartojamas žodis **svoris** reiškia tai, ką fizikai vadina **mase.** Bulvės parduodamos supakuotos ir tiksliai atsvertos po 2 kg. Tačiau kilogramas yra masės vienetas (kaip ir svaras). **Svoris*** yra tai, ką jūs pajuntate, kai keliate bulvių ryšelį.



3.9 pav. **Skirtumas tarp masės ir svorio. Masė atspindi medžiagos kiekį kūne (matavimo vienetas – kilogramas). Svoris – tai jėga, veikianti gravitaciniame lauke esantį kūną (matavimo vienetas – niutonas). Čia trijų kūnų masės yra lygios, bet jų svoriai – labai skirtingi**

Žr. 6 ir 9 klausimus.

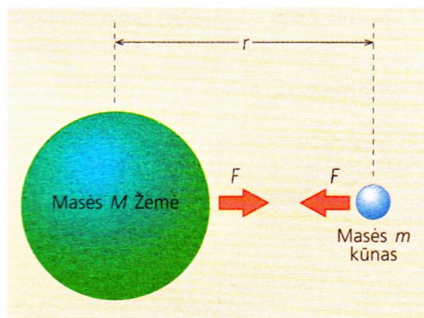
Paprasčiausias svorio apibrėžimas būtų toks:

Svoris yra gravitacijos jėga, kuria kūną veikia Žemės masė.

Kaip jau išsiaiškinome, ši jėga priklauso nuo kūno masės. Arti Žemės paviršiaus 1 kg masę veikia apytiksliai 9,8 N jėga. 2 kg masė atrodo sunkesnė nei 1 kg masė, nes ją veikianti gravitacinė jėga yra dukart didesnė: 19,6 N.

Ši jėga kinta keičiantis atstumui iki Žemės centro. Tačiau netgi aukštyje, kuriame paprastai skrieja Žemės palydovai (tarkime, 100 km virš Žemės paviršiaus) vienam kilogramui tenkanti jėga yra tik šiek tiek mažesnė nei 9,5 $N \cdot kg^{-1}$. Žinoma, kaip tik ši jėga ir palaiko palydovą Žemės orbitoje (žr. 4 skyrių).

Svoris atspindi tik vieną jėgą iš veikiančių **jėgų poros.** Pagal trečiąjį Niutono dėsnį antroji jėga parodo, kaip kūnas traukia Žemę.



3.10 pav. **Jėgos visuomet atsiranda poromis. Kaip Žemė traukia kūną, taip ir kūnas traukia Žemę**

* Šioje knygoje neskiriamos svorio ir sunkio sąvokos. – *Vert. past.*

6 JUDĖJIMAS VIENALYČIAME GRAVITACINIAME LAUKE

Šiame skirsnyje nagrinėsime judėjimą arti Žemės paviršiaus, kai lauko stiprį pagrįstai galima laikyti pastoviu ir lygiu 9,8 $N \cdot kg^{-1}$.

PAVYZDYS

K Į šulinį metama smulki moneta. Pliūkštelėjimas pasigirsta po 2,3 s. Koks šulinio gylis? (Tarkime, garsas sklinda pakankamai greitai ir nesukelia laiko paklaidos.)

A Kuri nors iš 15–17 psl. pateiktų kinematinių lygčių turėtų aprašyti sąryšį tarp pagreičio (šiuo atveju g), pradinio greičio (šiuo atveju nulis), nueito kelio x ir kritimo laiko t:

$$x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

Įrašius skaitines vertes: $x = 0 + \frac{1}{2} \times 9{,}8 \times (2{,}3)^2$

$$= 26 \text{ m}$$

Žr. 1, 7 ir 10 klausimus.

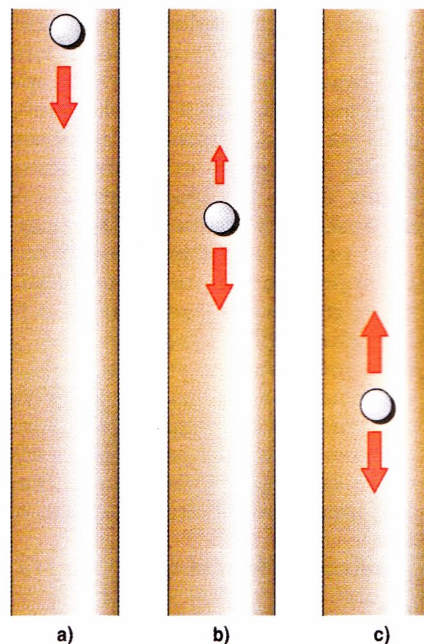
Ribinis greitis

Kokiu greičiu šiame pavyzdyje judės moneta prieš pat pasiekdama vandenį? Galutinį greitį galima apskaičiuoti taip:

$$v_1 = v_0 + at$$
$$= 0 + 9{,}8 \times 2{,}3$$
$$= 23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Jei į šulinį būtų metama ne moneta, o teniso kamuoliukas, tai kritimo iki vandens trukmė būtų gerokai ilgesnė. Mat greitėjant kūnui aplinkoje (čia – ore) didėja ir pasipriešinimo (trinties) jėga, kuri suteikia priešingos krypties pagreitį (žr. 3.11 pav.). Kai pasipriešinimo jėga prilygsta greitinančiai jėgai, *atstojamoji* kūną veikianti jėga prilygsta nuliui. Tada kūnas nebegreitėja ir toliau juda pastoviu greičiu. Krintančio kūno atveju tai vadinama **ribiniu greičiu.**

Plieninio rutuliuko ribinis greitis yra 40 m · s^{-1}, tuo tarpu stalo teniso kamuoliuko jis būtų 5 m · s^{-1}. Jei iškristumėte iš lėktuvo, pasiektumėte maždaug 70 m · s^{-1} ribinį greitį. Parašiutas padidina oro pasipriešinimą ir sumažina ribinį greitį iki keleto metrų per sekundę (priklausomai nuo konstrukcijos).



3.11 pav. **Jėgos, veikiančios į šulinį krintantį teniso kamuoliuką.**
a) **Viršuje kamuoliukas nejuda, todėl oro pasipriešinimo jėga lygi nuliui.**
b) **Kamuoliukui krintant į šulinį oro pasipriešinimas didėja, ir kritimo pagreitis mažėja.**
c) **Oro pasipriešinimo jėga sukompensuoja kamuoliuko svorį ir jis daugiau nebegreitėja. Šiuo momentu kamuoliukas pasiekia ribinį greitį**



3.12 pav. **Parašiutininkai pasiekė ribinį greitį**

?

N Mažas plieninis rutuliukas laikomas prie pat pilno aliejaus stiklainio paviršiaus ir paleidžiamas kristi. Stiklainio aukštis yra apie 0,5 m. Aprašykite rutuliuko judėjimą ir iliustruokite savo atsakymą greičio priklausomybės nuo laiko grafiku.

O Nurodykite jėgų poras (gali būti daugiau nei viena), veikiančias šiomis aplinkybėmis:

a) Mėnulį, judantį savo orbita;

b) akmenį, tuoj pat po to, kai buvo paleistas kristi į šulinį;

c) neišskleidusį parašiuto parašiutininką, pasiekusį ribinį greitį.

AUKŠTYN, AUKŠTYN IR Į TOLĮ

DAUGUMA ŽMONIŲ MANO, kad paukščiai sparnais plasnoja tam, kad nekristų iš dangaus, o pirmieji oreiviai bandė šiuos judesius atkartoti. Jie konstruodavo skraidymo aparatus su mosuojančiais sparnais, tačiau visada patirdavo nesėkmę.

Iš tikrųjų sparno forma – tiek paukščio, tiek lėktuvo – nulemia skrydžio galimybę, t. y. kad sparnui judant į priekį jį veiktų į viršų nukreipta **keliamoji jėga.** Keliamąją jėgą sukelia slėgių skirtumas, atsirandantis dėl to, kad oras apteka sparną iš viršaus didesniu greičiu, negu iš apačios. Taip yra dėl sparno konstrukcijos ypatumų. Tiek paukščių, tiek lėktuvų sparnų viršutinė dalis yra iškila, o apatinė – plokštesnė. Todėl iš viršaus sparną aptekančio oro kelias ilgesnis, taigi greitis didesnis. Dėl to virš sparno susidaro mažesnis oro slėgis nei apačioje, ir sparnas yra keliamas į viršų.

Jei paukštį ar lėktuvą į priekį varanti jėga sumažėja, tai jie arba iš karto krinta stačiai žemėn, arba, veikiami gravitacijos jėgos, sklendžia į priekį vis žemyn. Daugelis paukščių yra labai gerai „sukonstruoti" tokiam judėjimui – pavyzdžiui, kirai, ereliai ar suopiai yra tobuli sklandytojai. Bet jei jie vien tik sklęstų, vis tiek anksčiau ar vėliau neišvengiamai pasiektų žemės paviršių. Lėktuvus į priekį varo varikliai, o kaip judėti į priekį pavyksta paukščiams? Būtent dabar praverčia plasnojimas. Iš esmės paukščio sparnų judesiai yra analogiški plaukiko yriams. Sparnas pasuktas tokiu kampu, kad stumtų orą judėdamas atgal, tačiau judėdamas į priekį pasisuka taip, kad sumažintų pasipriešinimą. Rezultatas – į priekį varanti jėga. Tie judesiai vyksta labai greitai ir buvo ištirti pasitelkus greitaveikes kino kameras.

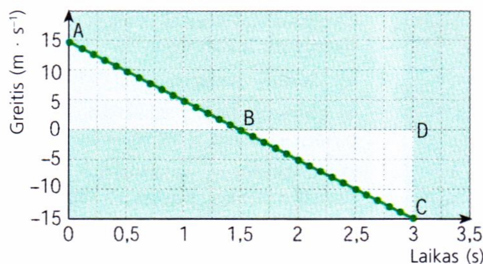


Geriausiai šias jėgas atspindi juosta, kurioje užfiksuotas paukščio skrydis pro smulkių muilo burbuliukų debesį. Muilo burbuliukai padaro matomus oro srautus (sūkurius), kuriuos palieka paukščio sparnas, kaip kad vandens burbuliukai ženklina laivo kilvaterį.

Aukštyn ir žemyn

PAVYZDYS

K Paveiksle pateiktas vertikaliai aukštyn pradiniu 14,7 m · s^{-1} greičiu mesto kamuolio greičio priklausomybės nuo laiko grafikas. **a)** Į kokį aukštį jis pakils? **b)** Koks bus visas jo nueitas kelias? **c)** Kokia yra kamuolio lėkio trukmė? (Į oro pasipriešinimą galima neatsižvelgti.)



3.13 pav. **Vertikaliai į viršų pradiniu 14,7 m · s^{-1} greičiu mesto kamuolio greičio priklausomybė nuo laiko**

A

a) Šiame uždavinyje svarbu yra kryptys, todėl turime atkreipti dėmesį į vektorinių dydžių *ženklus.* Laikysimės susitarimo, kad kryptis *į viršų* yra teigiama, o *žemyn* – neigiama. Aukštį, kelią x, atitinka plotas po grafiko dalimi AB. Čia tinka lygtis:

$$v_1^2 = v_0^2 + 2ax$$

Viršutiniame taške kamuolio greitis lygus nuliui, o $a = -9{,}8$ m · s^{-2}.

Gauname: $0 = (14{,}7)^2 - (2 \times 9{,}8 \times x)$,

iš kur: $19{,}6 \times x = (14{,}7)^2$

Kamuolio pasiektas maksimalus aukštis: $x = 11{,}0$ m

b) „Visas nueitas kelias" gali reikšti du dalykus. Griežtai imant galima jį suprasti kaip kūno **poslinkį** iš tos vietos, kurioje prasidėjo judėjimas. Šį atstumą atitinka dviejų plotų OAB ir BCD suma. Šie plotai yra lygaus dydžio, tačiau jų ženklai yra priešingi, todėl suma lygi nuliui. Iš to tegalime padaryti išvadą, kad kamuolys nukrito ton pačion vieton, iš kur buvo išmestas! Galinis greitis lygus –14,7 m · s^{-1}. Taigi, naudodami tą pačią formulę visam nueitam keliui, gauname:

$$(-14{,}7)^2 = (14{,}7)^2 - (2 \times 9{,}8 \times x)$$

o apskaičiavę šį reiškinį gauname, kad $x = 0$.

Akivaizdu, kad nagrinėdami **nevektorinę (skaliarinę)** kelių, nueitų kylant ir leidžiantis, sumą, gautume, kad kamuolys nuskriejo 22 m kelią.

c) Kas yra kamuolio lėkio trukmė? Ore išbūtas laikas? Tai galima nustatyti naudojantis formule $v_1 = v_0 + at$, pagal kurią gautume:

$$t = \frac{v_1 - v_0}{a} = \frac{-14{,}7 - 14{,}7}{-9{,}8}$$
$$= 3 \text{ s}$$

P Berniukas, bėgantis 3 m · s^{-1} greičiu, meta sviedinį vertikaliai aukštyn pradiniu greičiu 5 m · s^{-1}.

a) Jeigu jis ir toliau bėgtų tuo pačiu greičiu, ar jam pavyktų pagauti krintantį sviedinį? (Taip ar ne.)

b) Kiek laiko išbus ore sviedinys?

c) Kokį nuotolį per tą laiką įveiks berniukas?

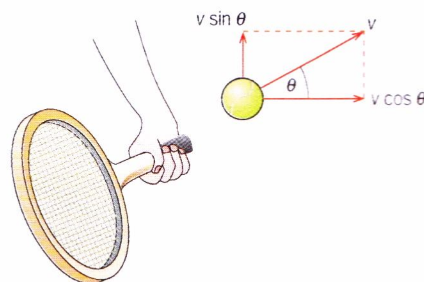
K Nagrinėjant judėjimą vienodo stiprio gravitacijos lauke labai praverstų dinaminė duomenų lentelė; prisiminkite 2 skyriaus užduotis, taip pat panagrinėkite užduotis šio skyriaus pabaigoje.

Žr. 11, 14 ir 15 klausimus.

7 KAMPU Į HORIZONTĄ MESTAS KŪNAS

Panagrinėkime kūną, laisvai judantį po to, kai jį paveikė jėga. Kai jūs paspiriate futbolo kamuolį ar rakete atmušate teniso kamuoliuką, jie įgauna greitį, kurio kryptis yra tarp horizontalios ir vertikalios (žr. 3.14 pav.). Jie juda tiek į viršų, tiek į priekį. Diagramoje pavaizduotas teniso kamuoliuko greitis v bei jo **vertikali dedamoji** $v \sin\theta$ ir **horizontali dedamoji** $v \cos\theta$.

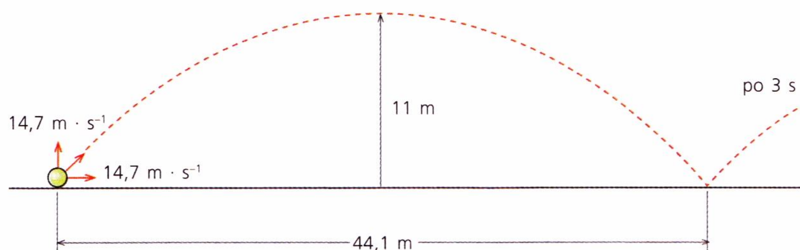
Gravitacijos jėga veikia vertikaliai žemyn – ji gali paveikti tik judėjimą vertikalia kryptimi. Jei oro pasipriešinimas yra toks mažas, kad galima jo nepaisyti (nors paprastai taip nebūna!), greitis horizontalia kryptimi išlieka toks pat (3.15 pav. ir 3.16 pav.). Tai reiškia, kad vienalyčiame gravitaciniame lauke horizontalioji ir vertikalioji greičio dedamosios viena nuo kitos nepriklauso.



3.14 pav. **Teniso kamuoliuko greitis**



3.16 pav. **Pusiau parabolės kreive krintantis kamuoliukas**



3.15 pav. **Vertikalusis ir horizontalusis judėjimas yra nepriklausomi. Judėjimą vertikalia kryptimi veikia gravitacija. Horizontalusis greitis išlieka toks pat iki kamuoliukas pasiekia žemę**

PAVYZDYS

Tarkime, kad paskutiniame pavyzdyje aprašytas kamuolys buvo paspirtas taip, kad 14,7 m · s^{-1} greičiu kilo į viršų ir tuo pat greičiu judėjo horizontalia kryptimi. Apskaičiavome, kad ore jis išbuvo 3 s. Ši trukmė nepriklauso nuo jo judėjimo horizontalia kryptimi. Taigi po 3 s jis nukris ant žemės.

K Kokį atstumą į šoną jis nulėks per tą laiką?

A 3 sekundes jis judėjo 14,7 m · s^{-1} greičiu, taigi jo nulėktas kelias yra 3 × 14,7 m, t. y. 44,1 m.

R Teniso kamuoliukas atmušamas 50° kampu į horizontą 16 m · s^{-1} greičiu. Jis atmuštas taške, esančiame labai arti žemės prie pat galinės linijos.

a) Koks jo vertikalusis greitis?

b) Kiek laiko jis išbus ore iki vėl pasieks žemę?

c) Teniso korto ilgis nuo vienos galinės linijos iki kitos yra 23,8 m. Ar kamuoliukas nusileis korto ribose?

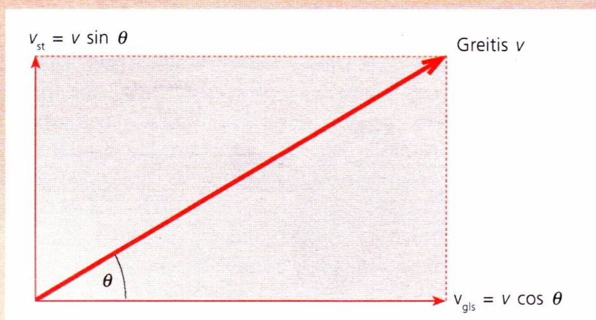
Išplėstiniame intarpe pateikta bendresnė formulė kampu į horizontą mesto kūno judėjimo uždaviniams spręsti, tačiau galima išspręsti uždavinius ir šiais etapais.

- Pirmiausia išskaidykite greičio vektorių į dedamąsias ir raskite atskirai vertikalųjį ir horizontalųjį greičius.
- Po to apskaičiuokite lėkio trukmę t, kaip aptarta anksčiau, naudodamiesi formule $v_1 = v_0 + at$ (supaprastintu atveju $v = gt$).
- Tada įrašę t ir horizontaliosios greičio dedamosios vertes raskite horizontalia kryptimi nueitą kelią.

Žr. 12 ir 13 klausimus.

Kampu į horizontą mesto kūno formulė

Kaip parodyta, vertikalioji greičio dedamoji yra lygi $v\sin\theta$, o horizontalioji lygi $v\cos\theta$.



3.17 pav. **Horizontalioji ir vertikalioji greičio dedamosios**

Lėkio trukmė

Lėkio trukmė T yra dvigubai ilgesnė nei kilimo trukmė t. Iš pagrindinės kinematikos lygties ($v = at$) gauname:

$$t = \frac{v\sin\theta}{g}, \text{ iš kur } T = \frac{2v\sin\theta}{g}$$

Lėkio nuotolis

Horizontalusis **lėkio nuotolis** R – tai atstumas, kurį nulekia kūnas greičiu $v\cos\theta$ judėdamas laiką T. Naudojame formulę:

Kelias = greitis × laikas

$$R = Tv\cos\theta = \frac{2v^2\sin\theta\cos\theta}{g}$$

Aukštis

Kūnas pasiekia aukštį h. Jį nesunku rasti iš lygties, siejančios vertikalųjį greitį su keliu, nueitu kol kylama aukštyn:

$$v_1^2 - v_0^2 = 2gh$$

Šiuo atveju v_1 yra lygus nuliui, o v_0 iš tiesų yra $v\sin\theta$. Todėl:

$$v^2\sin^2\theta = 2gh \text{ arba } h = \frac{v^2}{2g}\sin^2\theta$$

Maksimalus nuotolis

Kūnas nuskrieja maksimalų atstumą, kai jis metamas $\theta = 45°$ kampu. Įrodykime.

Pirmiausia pasinaudokime trigonometrine formule:

$$2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$$

Įrašę tai į anksčiau pateiktą formulę, aprašančią lėkio nuotolį R, gausime:

$$R = \frac{v^2}{g}\sin 2\theta$$

Esant tam tikram v, nuotolis R įgyja maksimalią vertę, kai $\sin 2\theta$ yra maksimalus. Sinuso vertė didžiausia, kai kampas lygus 90°. Taigi maksimali R vertė bus, kai $2\theta = 90°$, arba $\theta = 45°$. **Tai taip pat reiškia, kad horizontalus ir vertikalus greičiai yra lygūs.**

?

S Cirkininkas iššaunamas iš patrankos ir tikimasi, kad jis nusileis ant tinklo, esančio už 25 m. Patranka nukreipta 45° kampu į horizontą. Kokiu greičiu turi išlėkti iš patrankos žmogus, kad tikrai nusileistų ant tinklo?

?

T (Šiame uždavinyje į oro pasipriešinimą neatsižvelkite.) Mušėjas atmuša beisbolo kamuoliuką taip, kad jis nulekia 24 m · s^{-1} greičiu 30° kampu į horizontą.

a) Įrodykite, kad kamuoliukas turėtų nukristi ant žemės maždaug už 51 m (ne arčiau).

b) Aikštelės žaidėjas yra už 20 m nuo numatomo nusileidimo taško. Jis įstengia bėgti 8 m · s^{-1} greičiu. Ar jis suspės nubėgti į tokią poziciją, kad galėtų sugauti kamuoliuką? Pagrįskite savo atsakymą ir paaiškinkite, kas būtų, jei paisytume oro pasipriešinimo.

8 GRAVITACIJA PAKELIUI Į MĖNULĮ

Atrodytų, kad norint tiesiausiu keliu nuskraidinti kokį daiktą į Mėnulį, reikia palaukti, kol Mėnulis bus tiesiai virš mūsų, ir tada paleisti tą daiktą vertikaliai aukštyn, žinoma, labai greitai. *Koks* turėtų būti jo greitis, išsiaiškinsime kitame skyriuje – tas greitis turi būti bent jau 11 km · s^{-1}.

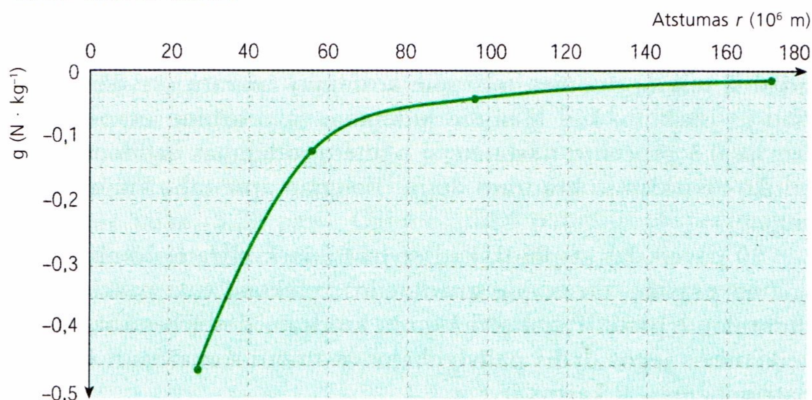
Tačiau nėra taip paprasta. Per tą laiką, kol kūnas pasiektų Mėnulio orbitą, Mėnulis būtų jau toli nuskriejęs. Taigi turime apskaičiuoti, kada paleisti kūną į viršų, kad šis pasiektų Mėnulio orbitą kaip tik tuo metu, kai Mėnulis bus būtent tame taške. Skaičiuodami turėtume atsižvelgti ir į tai, kad kūnas yra paleistas nuo besisukančios Žemės ir todėl turi tam tikrą greitį horizontalia kryptimi. Bendrai paėmus, paleisto kūno, judančio gravitaciniame lauke, trajektorija bus elipsė. Kosminė dinamika nėra jau tokia paprasta! (Daugiau apie tai 4-ame skyriuje.)

Pakeliui į Mėnulį kūną nuolat veiks Žemės gravitacijos jėga. Ji nukreipta link Žemės ir suteikia kūnui neigiamą pagreitį. 3.2 lentelėje pateikti konkretūs duomenys apie Apollo 11 skrydį į Mėnulį 1969 liepos mėnesį. Tai buvo vienas iš projektų, pagal kuriuos kosminiai aparatai buvo siunčiami iš Žemės į Mėnulį.

3.2 lentelė. **Duomenys apie Apollo 11 skrydį į Mėnulį. Laiko intervalas tarp pateiktų gretimų greičio verčių yra 600 s**

Greitis intervalo pradžioje ir pabaigoje (m · s^{-1})	Atstumas nuo Žemės centro kiekvieno intervalo pradžioje ir pabaigoje (10^6 m)	Pagreitis kiekviename 600 s intervale	Vidutinis atstumas nuo Žemės centro kiekviename laiko intervale (10^6 m)
5374	26,3	−0,45	27,65
5102	29,0		
3633	54,4	−0,12	55,4
3560	56,4		
2619	95,7	−0,04	96,45
2594	97,2		
1796	169,9	−0,01	170,4
1788	170,9		

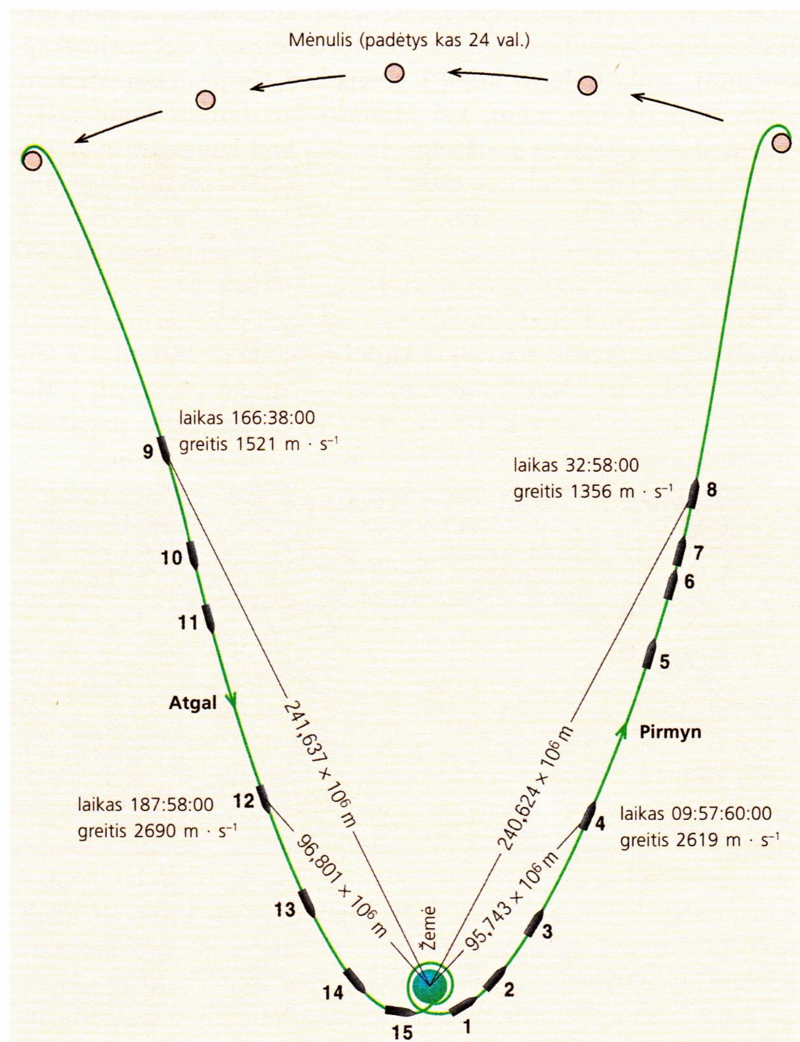
Kosminio aparato pagreitis rastas apskaičiavus greičio pokytį kiekviename laiko intervale ir padalijus jį iš to intervalo trukmės – 600 s. 3.2 lentelės duomenys ne tik rodo, kad kosminis aparatas link Mėnulio juda lėtėdamas, bet ir tai, kad jo neigiamas pagreitis mažėja tolstant nuo Žemės. Neigiamas pagreitis atsiranda dėl Žemės traukos, todėl ši jėga turėtų mažėti, kaip parodyta 3.18 pav. Kaip jau aptarėme anksčiau, kosminio aparato neigiamas pagreitis yra lygus Žemės gravitacinio lauko stipriui *g* tame erdvės taške.



3.18 pav. **Gravitacinio lauko stiprio priklausomybė nuo atstumo pagal Apollo 11 duomenis, pateiktus 3.2 lentelėje. Ji rodo, kad *g* vertė mažėja tolstant nuo Žemės centro**

Atvirkštinio kvadrato dėsnis

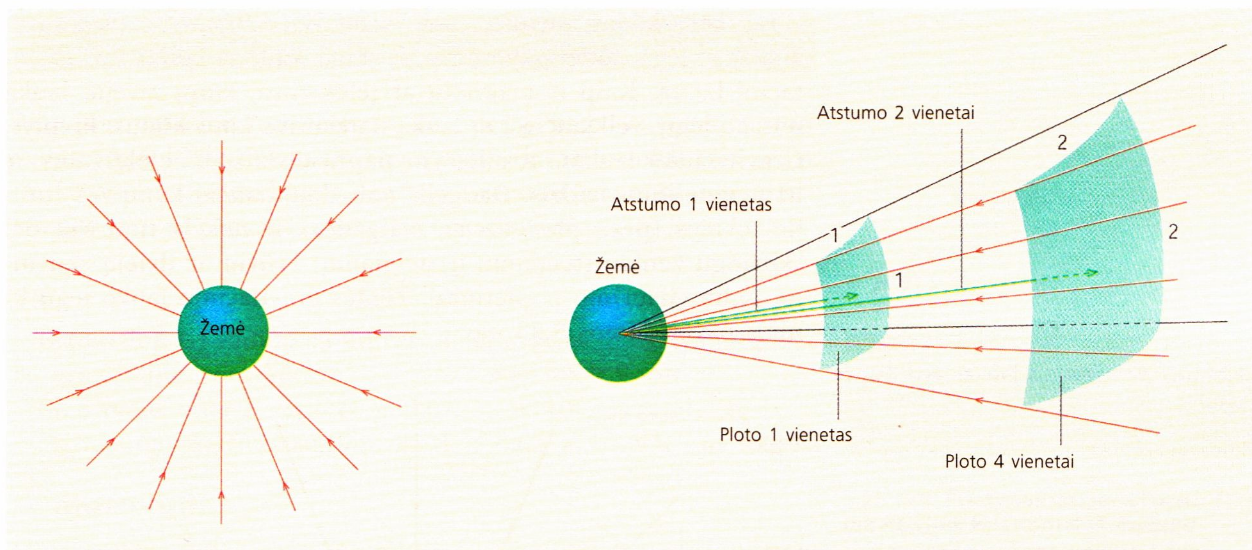
3.18 paveiksle pateiktas grafikas rodo, kad išmatuotoji *g* vertė sparčiai mažėja didėjant nuotoliui. Beje, laikomasi susitarimo, kad kosminis aparatas skrieja tiesia linija iš Žemės į Mėnulį. Kaip matyti iš 3.19 pav., tai yra labai tolima nuo tikslios trajektorijos prielaida.



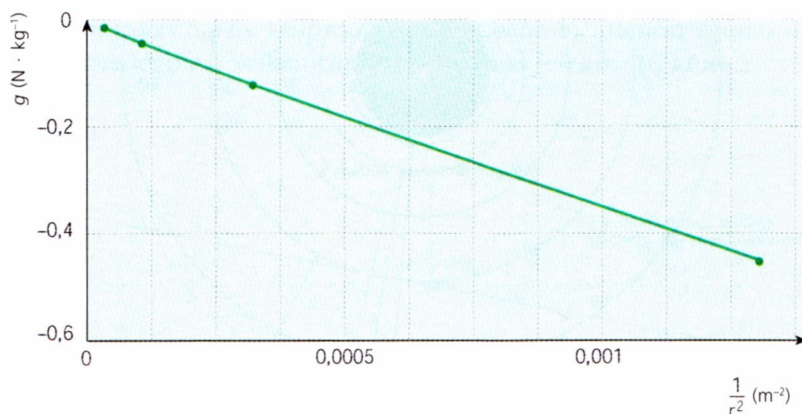
3.19 pav. **Apollo 11 trajektorija**

Dar septynioliktajame amžiuje Niutonas teigė, kad Žemės gravitacinio lauko stipris turėtų kisti atvirkščiai proporcingai atstumo nuo jos centro kvadratui. Niutonas neturėjo galimybės pagrįsti šį teiginį duomenimis apie kosminių aparatų skrydžius, tačiau jis įsitikino, kad Mėnulio judėjimas savo orbita sutapo su jo teorija 0,5 procento tikslumu, o planetų judėjimas orbitomis irgi atitiko atvirkštinio kvadrato dėsnį. Daugiau apie tai – kitame skyriuje.

3.20 paveikslas atspindi, kad atvirkštinio kvadrato dėsnio idėja įgauna prasmę, tarus, jog gravitacijos „efektas“ turi pasklisti vis didesniame plote. Pagal atvirkštinio kvadrato dėsnį bet kokį kūną veikiančios jėgos dydis padvigubėjus atstumui sumažėja 4 kartus, patrigubėjus – 9 kartus ir t. t.



3.20 pav. **Iš rutulio išeinančios lauko linijos atspindi atvirkštinio kvadrato dėsnio veikimą. Atstumui padvigubėjus, tas pats jėgų linijų skaičius kirs keturis kartus didesnį plotą**



3.21 pav. ***g* priklausomybė nuo $1/r^2$ pagal 3.2 lentelėje pateiktus duomenis. Tai beveik tiesė, taigi patvirtina atvirkštinio kvadrato dėsnį**

■ Žr. 20 klausimą.

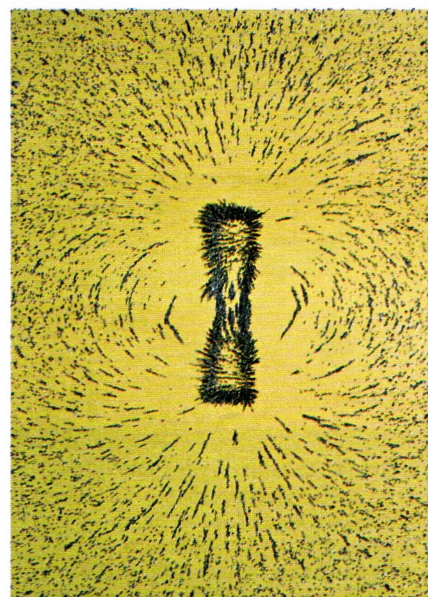
3.21 paveiksle *g* vertės iš 3.2 lentelės atidėtos kaip $1/r^2$ funkcija, kur *r* – atstumas nuo Žemės centro. Tai, kad ši priklausomybė yra beveik tiesinė, patvirtina, jog *g* yra proporcingas $1/r^2$. Duomenys nėra idealūs, kadangi kosminis aparatas nejudėjo tiksliai tiese, jungiančia Žemės ir Mėnulio centrus.

9 LAUKŲ VIZUALIZAVIMAS

Kaip atrodo magnetinis laukas, galima pamatyti padėjus ant magneto popieriaus lapą ir pabarsčius ant jo geležies drožlių. Kiekvienas geležies gabaliukas veikia kaip indikatorius ir orientuojasi išilgai magnetinio lauko jėgos veikimo krypties tame taške. Taip išsidėsčiusios lauko linijos rodo jėgos lauko kryptį bet kuriame taške (3.22 pav.). Galime atlikti panašius eksperimentus ir atvaizduoti elektrinio lauko jėgas (žr. 10 skyrių).

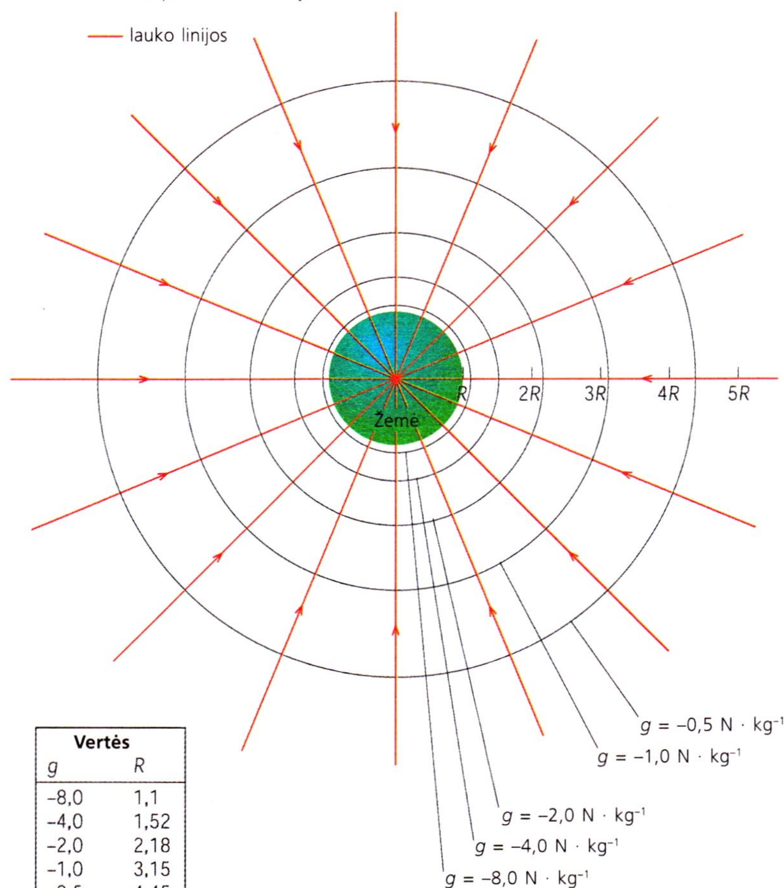
Negalime tokiais eksperimentais pademonstruoti gravitacinio lauko, nes veikiančios jėgos yra per silpnos. Tačiau jį galime atvaizduoti tuo pačiu metodu.

3.22 pav. **Geležies drožlės, rodančios lauko pasiskirstymą magneto aplinkoje**



Bet koks kūnas, turintis masę, veikia kitus kūnus traukos (gravitacijos) jėga, todėl galime įsivaizduoti, kad tas kūnas turi gravitacinį lauką. Kaip ir magnetų ar įelektrintų kūnų atveju, lauką nusako jėgų, veikiančių į tą lauką patekusius kitus kūnus, kryptys. Gravitaciniai laukai, atrodo, yra paprastesni ir už elektrinius, ir už magnetinius laukus. Daugelis mus dominančių kūnų yra rutulio formos (pvz., planetos ar žvaigždės), ir nekyla rūpesčių dėl skirtingų ženklų (teigiamų ir neigiamų) krūvių ar dviejų skirtingų polių (šiaurinio ir pietinio). Žemės gravitacinio lauko jėgų linijos pavaizduotos 3.23 pav.

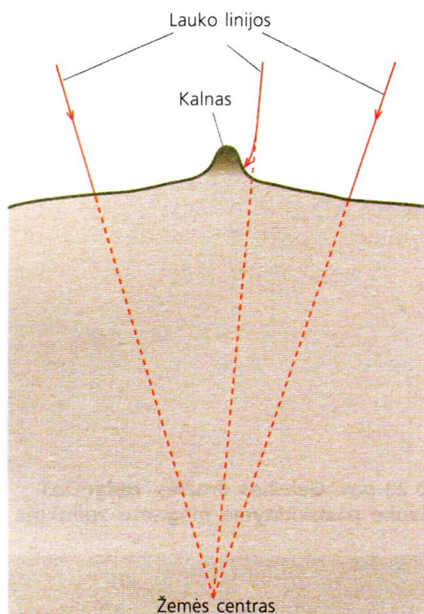
3.23 pav. **Gravitacinis laukas arti Žemės**



Vertės

g	R
-8,0	1,1
-4,0	1,52
-2,0	2,18
-1,0	3,15
-0,5	4,45

3.24 pav. **Arti paviršiaus Žemės gravitacinis laukas yra iškreiptas dėl tokių stambių darinių kaip kalnai**



Išsamiau nagrinėjant, galima įsitikti, kad lauką, atvaizduotą 3.23 pav., gali iškreipti aukšti kalnai ar itin didelio tankio sritys Žemės plutoje. Tai parodyta 3.24 pav.

Žr. 8 klausimą.

Statmenos Žemės paviršiui linijos atitinka Žemės gravitacinio lauko kryptį bet kuriame taške. Jei Žemė būtų idealiai vienalytė, apvali ir nejudanti, tai tokios tiesės vienas galas būtų Žemės centre, kitas – zenite (taške, esančiame tiesiai virš stebėtojo galvos). Tačiau arti kalno jėgų linijos šiek tiek nukrypsta nuo šios tiesės – užlinksta kalno link.

Lauko stipris dažnai pavaizduojamas glaudžiau braižant linijas ten, kur laukas stipresnis, ir labiau nutolusias ten, kur jis silpnesnis. Todėl, kaip pavaizduota 3.20 pav., linijos, nubrėžtos iš Žemės centro, tiksliai atvaizduoja atvirkštinių kvadratų dėsniu aprašomo lauko konfigūraciją. Kai atstumas nuo Žemės centro padvigubėja, tas pats linijų skaičius kerta keturis kartus didesnį plotą.



U Žemės spindulys lygus 6400 km. Koks atstumas tarp dviejų vietovių Žemės paviršiuje, jei radialinio gravitacinio lauko kryptys tose vietovėse skiriasi vienu laipsniu?

10 NIUTONO VISUOTINĖS TRAUKOS (GRAVITACIJOS) DĖSNIS

Niutonas paskelbė visuotinės traukos dėsnį, pagal kurį galima nustatyti jėgą, kuria dviejų skirtingų masių kūnai traukia vienas kitą. Įsivaizduokite du kūnus, kurių masės atitinkamai M ir m, o atstumas tarp jų centrų lygus r. Jie traukia vienas kitą jėga F:

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

■ Žr. 21 ir 22 klausimus.

G (didžioji G) vadinama universaliąja gravitacine konstanta (arba gravitacijos konstanta).

Šiuo metu sutarta vertė $G = 6{,}67259 \times 10^{-11}$ N · m² · kg⁻² .

Dažniausiai skaičiuodami imame $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ N · m² · kg⁻².

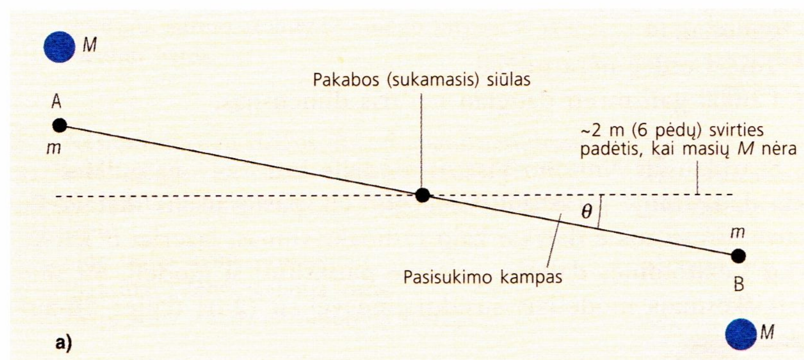
?

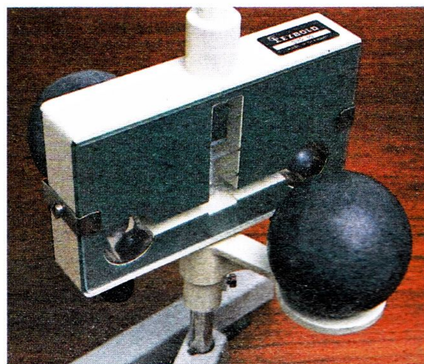
V Naudodamiesi gravitacijos formule įsitikinkite, kad G matavimo vienetas yra $N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$.

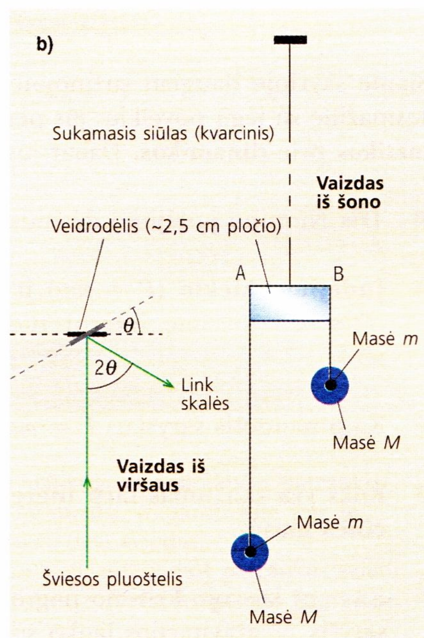
G matavimas

Universaliąją gravitacijos konstantą G išmatuoti yra sunku. Jėga, veikianti tarp dviejų 1 kg masės kūnų, nutolusių 1 m atstumu, yra labai maža, tik $6{,}67 \times 10^{-11}$ N. Pirmąjį tikslų matavimą atliko anglų mokslininkas Henris Kavendišas (*Henry Cavendish*) 1798 metais. (Jis tai atliko prietaisu, panašiu į tą, kuriuo naudojosi prancūzų mokslininkas Šarlis Kulonas (*Charles Coulomb*) matuoti žymiai didesnėms jėgoms, veikiančioms tarp dviejų įelektrintų kūnų.)

3.25 pav. **Prietaisas universaliajai gravitacijos konstantai *G* matuoti.**
a) **Kavendišo sukamųjų svarstyklių veikimo principas. Masių *M* ir *m* kūnai traukia vienas kitą.**
b) **Boiso prietaisas. Svirties AB nuokrypis matuojamas naudojant šviesos pluoštelį, todėl pakanka visai nedidelio prietaiso. Nuotraukoje matote šiuolaikinį prietaisą *G* matavimui, veikiantį tuo pačiu principu kaip ir** a)







3.25a) paveiksle parodytos **sukamosios svarstyklės,** kurias Kavendišas naudojo savo eksperimentams. Gravitacijos jėgos tarp dviejų masių porų matuojamos pagal plonos vielutės pasisukimą. Kavendišo prietaisas buvo didelis – to jam reikėjo, kad būtų kiek galima didesnės jėgos ir poslinkiai. Tačiau dėl to kildavo nemažos paklaidos, tarp jų ir dėl oro srovių bei šiluminio plėtimosi poveikio.

Vėlesni eksperimentuotojai naudojosi daug mažesniais prietaisais. C. V. Boisas (*Boys*) 1895 m. naudojo 1 colio (2,54 cm) ilgio svirtį AB vietoj Kavendišo naudotos 6 pėdų ilgio svirties. Boisas svirties sukamą siūlą gamindavo iš labai plono kvarco, kurį gaudavo iššaudamas lydytą kvarcą iš arbaleto! Siūlo susukimo kampą jis matuodavo naudodamasis veidrodėliu ir šviesos pluošteliu.

Išmatavus G galima apskaičiuoti tokių kūnų kaip Saulė, Žemė, Mėnulis ir planetos, mases. Pavyzdžiui, žinome, kad jėga, veikianti tarp Žemės ir 1 kg masės kūno, apytiksliai lygi 9,81 N. Pertvarkę Niutono formulę gauname:

$$\text{Žemės masė } M = \frac{Fr^2}{Gm} = \frac{9{,}81 \times (6{,}38 \times 10^6)^2}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 1{,}00} \text{ kg}$$
$$= 5{,}99 \times 10^{24} \text{ kg}$$

Kas iš tikrųjų yra jėga?

Vis dėlto Niutonui jo gravitacijos teorija kėlė klausimų. Teorija atrodė teisinga, nes ją atitiko eksperimentų rezultatai, tačiau stigo patvirtinimo, kaip gravitacijos jėga gali veikti tarp kūnų, esančių visiškai tuščioje erdvėje. „Poveikis per atstumą“, kai nėra nieko, kas galėtų tą poveikį perduoti, neatrodė moksliškai. Kas gi perduoda tą trauką? Galiausiai jis pasidavė ir parašė *„Hypothesis non fingo“* – „Hipotezių neišgalvoju“.

Ši gravitacijos problema ilgai egzistavo neišspręsta, tačiau, kol teorija duoda teisingus rezultatus, fizikai paprastai ją toleruoja!

Praėjus šimtui metų nuo Niutono teorijos paskelbimo, buvo nustatyta kvadratinė priklausomybė tarp gravitacijos, elektros ir magnetizmo jėgų (žr. 14 ir 27 skyrius). Tada, devynioliktojo šimtmečio pradžioje, Maiklas Faradėjus (*Michael Faraday*, 1791–1867), daugelio elektromagnetinių reiškinių atradėjas, pasiūlė **lauko** sąvoką. Remiantis šiomis dviem idėjomis, visa, kas vyksta su kūnais, gali būti paaiškinta ir labai aiškiai matematiškai aprašyta.

Tačiau šiose devynioliktojo amžiaus lauko teorijose vis dar egzistavo „jėgos perdavimo problema“. Šiuolaikinėje fizikoje ši balta dėmė yra užpildyta pasitelkiant kai kurias gana keistas naujas idėjas, su kuriomis susidursime vėliau. Jas galima trumpai apibendrinti tokiais teiginiais:

- Jėgas erdvėje perneša tam tikros **dalelės** – fotonai, gravitonai, gliuonai.
- Tuščia erdvė nėra tuščia!
- Laukai gali turėti daugiau nei tris dimensijas.

Svarbiausias Niutono Visatos modelio bruožas – jis puikiai veikia daugumoje įprastinių situacijų. Tik pastaraisiais metais, kai buvo atrasti tokie dalykai kaip radioaktyvumas, lazeriai ir kai kurios subatominės dalelės, prireikė patikslinti šį modelį. Su šiuolaikiškesniais modeliais susidursime vėliau (2-os dalies 28-ame skyriuje).

SANTRAUKA

Šiame skyriuje daugiau sužinojote apie judėjimą, susipažinę su jėgų poveikiu: jūs perėjote nuo **kinematikos** prie **dinamikos.** Dabar jūs jau žinote:

- Tris Niutono judėjimo dėsnius.
- **Judėjimo kiekio** ($P = mv$) ir jėgos **impulso** ($Ft = \Delta P$) reikšmę interpretuojant šiuos dėsnius.
- Kaip naudotis sąryšiais $F = ma$ ir $Ft = \Delta P$.
- Koks yra skirtumas tarp **inercinės** ir **gravitacinės masės.**
- Kas yra laisvojo kritimo pagreitis g ir koks jo sąryšis su gravitacijos lauko stipriu.
- Koks skirtumas tarp **masės** ir **svorio.**
- Kaip nagrinėjami uždaviniai apie judėjimą vienalyčiame gravitacijos lauke (kampu į horizontą mesto kūno judėjimą).
- Kad gravitacijai galioja **atvirkštinio kvadrato dėsnis.**
- Jėgos **lauko** sąvoką.
- Kaip galima išmatuoti universaliąją gravitacijos konstantą G.

KLAUSIMAI

Atsakinėdami į klausimus vartokite teisingus fizikinius terminus – *jėga, masė, greitis, pagreitis, judesio kiekis* ir kt. Vartokite tokias suapvalintas g reikšmes: $9{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ arba $9{,}8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$;
$G = 6{,}67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.



Teoriniai klausimai

Klausimai sudaryti taip, kad paskatintų jus pagalvoti apie šiame skyriuje aptartų temų fizikinius pagrindus.

1 Slidininkė pradeda čiuožti žemyn nuo kalno, kurio nuolydis yra vienodas ir lygus 30°. Kalno šlaitas yra idealiai lygus, ir slidininkės pagreitis išilgai šlaito yra $g \sin \theta$.

a) Kokį greitį slidininkė pasieks po 6 sekundžių?
b) Kokį kelią ji bus nučiuožusi per tą laiką?
c) Kaip slidininkė, prireikus sustoti kaip galima greičiau, turėtų stabdyti? Sniego paviršius yra idealiai lygus.

2 Nesimokančiam fizikos jūsų draugui nesuprantama, kodėl „jėgos visą laiką veikia poromis". Jis pateikia keletą paneigiančių, jo manymu, šį teiginį pavyzdžių:

a) Nuo uolos krintantis akmuo.
b) Plaktuku į lentą kalama vinis.
c) Paspaudus stabdį automobilis sustoja.

Jūsų draugas įsitikinęs, jog visais šiais atvejais yra tik vienas kūnas, kurį veikia jėga, ir kad ši jėga yra vienintelė.

d) Pasiremkite Niutono fizikos žiniomis ir paaiškinkite, kodėl jis visais šiais atvejais klysta.

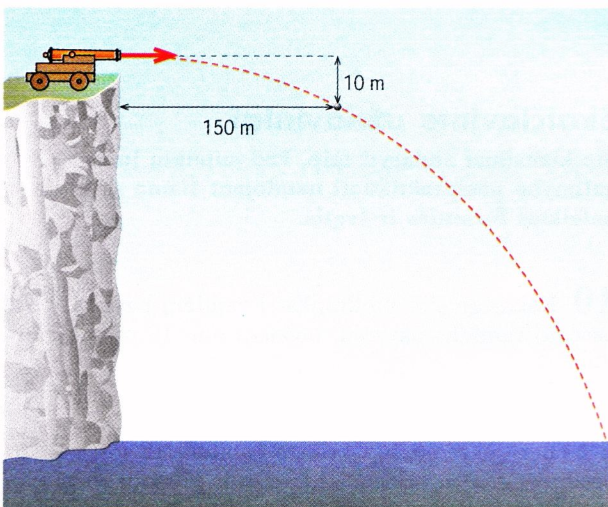
3 Pirmąjį Niutono judėjimo dėsnį (žr. 39 psl.) yra suformulavęs dar Galilėjus, daugiau kaip 40 metų anksčiau už pastarąjį. Tačiau Galilėjus manė, kad Mėnulis gali būti amžinai judančio kūno, kurio neveikia jokia jėga, pavyzdys.
Ar sutinkate su Galilėjumi dėl Mėnulio judėjimo? Pagrįskite atsakymą.

4 Napoleono karų laikotarpiu (devynioliktojo amžiaus pradžioje) laivai buvo mediniai ir apginkluoti iki 50 pabūklų (geležiniais sviediniais šaudančių patrankų), išdėstytų abipus denio. Buvo manoma, kad pavojinga vienu metu iššauti iš visų vienoje pusėje esančių patrankų, ir įgulai būdavo įsakoma šaudyti paeiliui iš kiekvieno pabūklo. Paaiškinkite galimą pavojų šaunant iš visų patrankų kartu ir kodėl šaudymas antruoju būdu yra saugesnis.

5

a) Paaiškinkite skirtumą tarp *inercinės masės, gravitacinės masės* ir *svorio*.
b) Kurie iš šių dydžių būtų skirtingi tam tikram labai dideliam skaičiui geležies atomų Mėnulyje palyginus su tuo pačiu jų skaičiumi Žemėje?

6 Patrankos sviedinys iššautas horizontaliai nuo pajūrio uolos viršūnės. Maždaug po sekundės jis buvo apie 150 metrų nuo uolos ir maždaug 10 metrų arčiau jūros paviršiaus.



3.K6 pav.

a) Nubraižykite schemą, vaizduojančią patrankos sviedinį tuo momentu, ir parodykite joje jėgą(as), veikiančią(ias) sviedinį.
b) Ar gravitacijos jėga turi įtakos patrankos sviedinio judėjimui horizontalia kryptimi? Pagrįskite atsakymą.

7

a) Kokia jėga veikia 4,80 kg masės kūną tokioje vietoje, kur gravitacijos lauko stipris yra 5,83 N · kg^{-1}?

b) Kokiu pagreičiu judėtų šis kūnas, jei galėtų laisvai judėti?

c) Kokiu pagreičiu judėtų 2000 tonų masės kūnas, jei jis būtų toje pačioje gravitacinio lauko vietoje?

Remdamiesi atsakymais į klausimus **a)**, **b)** ir **c)** paaiškinkite, kodėl laisvojo kritimo pagreitis ir gravitacinio lauko stipris yra tapatūs bet kuriame taške.

8

a) Nubraižykite diagramas, iliustruojančias gravitacinį lauką:
- **(i)** rutulio formos kūnui,
- **(ii)** tokių pat matmenų kaip ir **(i)** rutulio formos kūnui, tačiau dvigubai didesnio tankio,
- **(iii)** tarp dviejų rutulių, kai jų masės ir tankiai lygūs, o atstumas tarp rutulių dukart didesnis už jų skersmenį,
- **(iv)** maždaug jūsų mokyklos tūrio erdvėje arti Žemės paviršiaus.

b) Paaiškinkite jūsų diagramų ypatumus, būdingus kiekvienam iš šių keturių atvejų.

9 *Nėra tokios jėgos, kuria pavyktų ištempti kad ir ploniausią stygą taip, kad ši idealiai sutaptų su horizontalia linija.*
Kodėl?

Skaičiavimo uždaviniai

Šie klausimai sudaryti taip, kad suteiktų jums galimybę pasipraktikuoti naudojant šiame skyriuje pateiktas formules ir lygtis.

10 Kokiu greičiu šuolininkas į vandenį pasieks baseino vandens paviršių, nušokęs nuo 10 m aukščio tiltelio?

11 Berniukas atmuša kriketo kamuolį 12 m · s^{-1} pradiniu greičiu vertikaliai į viršų ir po to jį sugauna.

a) Skaičiuokite naudodamiesi kamuoliuko greičio priklausomybės nuo laiko grafiku. Sutarkime, kad kryptis vertikaliai aukštyn yra teigiama, o žemyn – neigiama.

b) Per kokį laiką kamuoliukas pasieks maksimalų aukštį?

c) Į kokį maksimalų aukštį pakils kamuoliukas?

12 Prie galinės linijos stovintis kriketo žaidėjas muša kamuoliuką už 70 m esančiu saugiu atstumu. Maksimalus greitis, kuriuo jis gali mušti kamuoliuką, yra 24 m · s^{-1}. Ar įmanoma, kad kamuoliukas pasieks vartelius prieš tai neatšokęs nuo žemės? Atsakymą pagrįskite.

13 Teniso korto ilgis yra 23,8 m. Norėdama permesti kamuoliuką virš savo varžovės, t. y. atmušti jį taip, kad labai aukštai pakilęs kamuoliukas vis tiek nukristų priešininkės aikštelės ribose, žaidėja atmuša kamuoliuką ties galine linija prie pat žemės paviršiaus 60^o kampu į žemę. Įsitikinkite, kad maksimalus greitis, kuriuo atmuštas kamuoliukas vis dar nenuskries už galinės linijos, yra apie 16 m · s^{-1}.

14 Iš aukšto namo palėpės išmetama sunki skrynia. Ji krinta iš 40 m aukščio ant purios sodo žemės ir įsminga į ją 45 cm.

a) Kokiu greičiu skrynia sminga į žemę? Oro pasipriešinimo nepaisykite.

b) Kokia yra vidutinė neigiamo pagreičio vertė skryniai smingant į žemę?

15 Oro balionui skriejant horizontaliai vos 20 m aukštyje virš žemės, oreivis nusprendžia pakilti aukščiau. Tuo tikslu jis iš baliono išmeta 20 kg smėlio, ir baliono masė tampa lygi 400 kg.

a) Per kokį laiką balionas įgaus 5 m · s^{-1} vertikalų greitį?

b) Kokiame aukštyje tuo metu bus balionas?

c) Tuo metu iš baliono išmetamas dar vienas smėlio maišelis.
- **(i)** Kokiu greičiu maišelis trenksis į žemę?
- **(ii)** Per kokį laiką jis pasieks žemę?

16 4 g masės kulka išlekia iš šautuvo vamzdžio 300 m · s^{-1} greičiu. Vamzdžio ilgis 0,74 m.

a) Kokia vidutinė jėga veikė: **(i)** kulką, **(ii)** šautuvą.

b) Šautuvo masė lygi 1,5 kg. Nepatyręs šaulys laikė jį neprisispaudęs, ir šūvio metu tarp šautuvo ir peties buvo 0,02 m tarpelis. Įvertinkite greitį, kuriuo šautuvo buožė smogė į šaulio petį.

17 Lentelėje pateiktos gravitacijos lauko stiprio *g* vertės kai kuriose Saulės sistemos planetose. Astronauto masė lygi 75 kg. Nusikopijuokite lentelę ir užpildykite ją duomenimis, rodančiais, kiek astronautas svertų kiekvienoje iš šių planetų.

Planeta	Merkurijus	Venera	Žemė	Marsas	Jupiteris
g (N · kg^{-1})	3,6	0,87	9,8	3,7	26
Astronauto svoris					

18 Elektriniame lauke iki tol parimęs elektronas greitinamas taip, kad nulėkęs 10 cm įgauna $2{,}5 \times 10^5$ m · s^{-1} greitį. Elektrono masė lygi $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg.

a) Paskaičiuokite vidutinį elektrono pagreitį.

b) Kokia vidutinė jėga veikė elektroną?

c) Televizoriaus kineskopuose elektronai yra greitinami. Ar konstruodami televizoriaus kineskopą gamintojai turi atsižvelgti į elektroną veikiančią gravitacijos jėgą? Atsakymą pagrįskite.

19 Statybininkas pasamdytas permūryti kaminą ant namo stogo. Naujoms plytoms užkelti ant stogo jis naudoja medinę dėžę, prikabintą prie per skriemulį permestos virvės. Baigęs mūryti, jis prikrauna pilną dėžę senų plytų, prieš tai stipriai pritvirtinęs kitą virvės galą žemės lygyje, kaip parodyta paveiksle. Dėžė kybo 12 m aukštyje. Statybininkas nulipa žemyn ir atriša virvę. Nelaimė, plytų prikrautos dėžės masė lygi 75 kg, o statybininko masė – tik 55 kg.

3.K19 pav.



Aprašykite matematiškai kiek įmanoma tiksliau, kas atsitiks, jei statybininkas visą laiką laikysis įsikibęs į virvę. Trinties nepaisykite.

20 Lentelėje pateikti duomenys gauti stebint kosminį aparatą, skriejantį tiesiai nuo Žemės. Atstumai matuojami nuo Žemės centro.

Atstumas (10^6 m)	8,2	10,2	12,2	14,2	16,2	20,2
Greitis (m · s^{-1})	10 210	9208	8471	7901	7424	6789
Greitis po 100 s (m · s^{-1})	9620	8820	8201	7703	7268	6691

Apskaičiuokite kosminio aparato pagreitį šiose padėtyse. Po to nubraižykite grafiką, kuris atspindėtų, ar gauti duomenys atitinka atvirkštinio kvadrato dėsnį.

21

a) Apskaičiuokite gravitacinės traukos jėgą, veikiančią tarp Žemės ir Mėnulio.

b) Po to raskite Mėnulio pagreitį, kuriuo jis juda link Žemės.

c) Ar Žemė juda su pagreičiu link Mėnulio?

d) Ar Mėnulis ir Žemė artėja vienas prie kito?

Duomenys: Žemės *GM* yra 4×10^{14} N · m^2 · kg^{-1};
Atstumas tarp Žemės ir Mėnulio = 60 Žemės spindulių
g Žemės paviršiuje = 9,8 N · kg^{-1};
Žemės masė $5{,}98 \times 10^{24}$ kg;
Mėnulio masė $7{,}3 \times 10^{22}$ kg.

22 Įvertinkite gravitacijos jėgą, veikiančią tarp jūsų ir klasėje ar laboratorijoje greta sėdinčio kaimyno. Aiškiai apibrėžkite, kokias darote prielaidas.

2, 3 ir 4 SKYRIŲ SCHEMĄ
žr. 81 puslapyje.

Užduotis

ELEKTRA PRIEŠ GRAVITACIJĄ; KOKIO AUKŠČIO GALI BŪTI KALNAI?

Gamtos dariniai, tarkime, uolienos, yra sudaryti iš kristalų, tiesiog sukibusių vienas su kitu ar „sulipdytų" sustingusia terpe. Dideli monokristalai yra retenybė, bet jei jie susiformuoja, tai dažniausiai būna tvirtesni, negu ta pati polikristalinės sandaros medžiaga.

Jėga, kuri laiko daleles kristale, yra elektrinės prigimties. Dauguma kristalų, sudarančių uolienas Žemės paviršiuje, yra joniniai kristalai, ir juose ši elektrinė jėga – tai traukos jėga tarp dviejų priešingo krūvio dalelių (jonų).

Jono krūvis yra mažas, paprastai lygus vieno ar keleto elektronų krūviui. Elektrono krūvis e lygus $1{,}6 \times 10^{-19}$ C. Tačiau jonai yra labai arti vienas kito, todėl ši jėga yra didelė palyginti su gravitacine tarpusavio sąveikos jėga arba gravitacijos jėga, kuri veikia joną dėl Žemės traukos.

Tačiau tarkime, kad turime neįprastai didelį keleto kilometrų aukščio kristalą. Kokios jėgos veiks apatinį jonų sluoksnį? Ar kristalas bus pakankamai stiprus, kad atlaikytų jį veikiančias jėgas, atsirandančias dėl jo svorio?

Įsivaizduokite, kad statote piramidę iš tešlos. Tešlos dalelės slegia vienos kitas, ir jei sulipdysite aukštą tešlinę piramidę, jos pagrindas išplis. Taip vyksta dėl to, kad jėgos tarp tešlos dalelių yra gana silpnos palyginti su jėgomis, veikiančiomis tarp uolienų ir net tokių kietųjų kūnų kaip ledas dalelių. Tačiau net ir ledas gali tekėti – ledynuose tai vyksta. Ledynas slenka „veikiamas savojo svorio". Tai, žinoma, vyksta dėl gravitacijos, kuri veikia didelį ledo luitą taip, kad stumia jį sudarančias daleles, o pastarųjų tarpusavio ryšys yra per silpnas, kad sustabdytų ledyno slinkimą ar net jo plyšinėjimą.



3.U1 pav. **Ledynas: nešvarumai ir uolienų nuolaužos išryškina ledyno slinkimo linijas**

Iš esmės tai gali nutikti ir mūsų kalnui, kurį galime įsivaizduoti esant labai dideliu kristalu (nors iš tiesų kalnus sudaro daugybė kristalų). Toliau pateikti klausimai supažindins jus su labai paprastu modeliu, pagal kurį galima labai apytikriai įvertinti, koks gali būti maksimalus kalno aukštis, jei tarsime, kad jo pagrindas pradės sklisti, kai gravitacijos jėga taps didesnė už tą pagrindą laikančią elektrinę jėgą.

1 Jėga, veikianti tarp jonų poros

Panagrinėkime įprastą, bet gana netvarią medžiagą – valgomąją druską (NaCl).

a) Valgomosios druskos tankis lygus $2170\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Koks yra vieno šios medžiagos molio tūris? Šios druskos molio masė lygi 0,0585 kg.

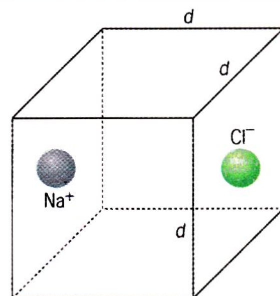
b) Bet kurios medžiagos molyje yra 6×10^{23} dalelių. Kiek jonų Na^+ ir Cl^- porų bus šio klausimo **a)** dalyje nagrinėtame tūryje?

c) Įrodykite, kad vienos jonų poros užimamas tūris yra maždaug $5 \times 10^{-29}\ \text{m}^3$.

d) Pavaizduokite šiuos jonus priešingose pusėse kubo, kurio tūris lygus $5 \times 10^{-29}\ \text{m}^3$ (3.U2 pav.). Apskaičiuokite šio kubo kraštinės ilgį d.

e) Kiekvienas iš jonų turi krūvį e (žr. įvadą). Tarp jų veikiančią jėgą aprašo formulė $F = ke^2/d^2$, kur k yra elektrinės jėgos konstanta, o jos vertė lygi $9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$. Parodykite, kad tarp jonų veikia $1{,}7 \times 10^{-9}$ N elektrinė traukos jėga.

3.U2 pav. **Ant priešingų kubo sienelių esančių jonų pora**



2 Gravitacijos jėga

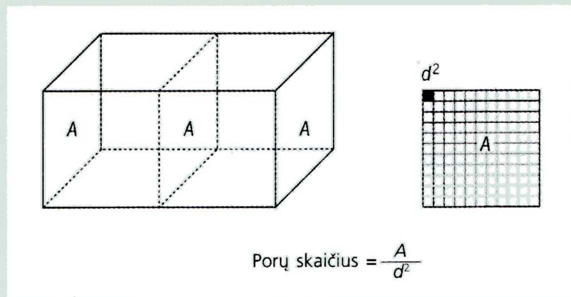
Natrio ir chloro jonų masės yra lygios atitinkamai $3{,}8 \times 10^{-26}$ kg ir $5{,}9 \times 10^{-26}$ kg. G lygi $6{,}7 \times 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

a) Kokio didumo gravitacijos jėga veikia tarp jonų?

b) Kiek kartų elektrinė jėga viršija šią gravitacijos jėgą?

3 Slenkantis kalnas

a) Sumodeliuokime didžiulio monokristalinio kalno apačioje esančią medžiagą įsivaizduodami kubo formos kristalą, kurio skerspjūvio plotas yra lygus *A* kvadratinių metrų, kaip pavaizduota 3.U3 pav. Šiam kristalui atplėšti prireiks nemažos jėgos – didesnės už elektrinės traukos jėgas, veikiančias tarp visų tame plote esančių jonų porų.



3.U3 pav. **Kristalo dalis, kurioje yra daug jonų porų**

(i) Užrašykite šios jėgos išraišką, kuri susietų atsakymą į anksčiau pateiktą klausimą **1e)**, *A* ir *d*.
(ii) Įrodykite, kad į šonus nukreiptas „slėgis", kurio pakaktų kristalui suskaldyti, yra maždaug 10^{10} Pa. Tai ir bus kristalo atsparumas tempimui.
Idealūs grynų medžiagų kristalai yra daug tvirtesni nei ta pati polikristalinio pavidalo medžiaga su priemaišomis, nes tokia medžiaga turi daug defektų (žr. 107 psl.). Praktikoje net tokių tvirtų medžiagų kaip granitas atsparumas gniuždymui yra tik 2×10^8 Pa (200 MPa). Tai tokia deformacija, kuriai veikiant uoliena sutrupėtų ir subyrėtų.

b) Slėgis į *h* aukščio uolienos kolonos pagrindą yra ρgh, kur ρ yra jos tankis, Žemės paviršiaus uolienoms jis maždaug lygus 2600 kg · m^{-3}. Apskaičiuokite, kokio aukščio *h* kalno slėgis į pagrindą prilygs slėgiui, kurio reikia suardyti uolienai.

c) Everestas yra aukščiausias kalnas Žemėje; jo aukštis – kiek mažiau nei 9 km. Aukščiausio kalno Marse aukštis lygus maždaug 25 km. Nurodykite galimas tokio skirtumo priežastis.

ENERGIJA

ENERGIJA yra viena iš fundamentaliausių fizikos sąvokų. Šioje knygoje tėra tik keletas skyrių, kuriuose ši sąvoka nepaminėta. Čia trumpai aptarsime, kaip šiuolaikinėje fizikoje nusakoma energijos koncepcija.

Energijos apibrėžimas

Paprasčiausias energijos apibrėžimas būtų toks:

Energija – tai sistemos gebėjimas atlikti darbą.

Darbas atliekamas tada, kai jėga verčia ką nors judėti.

Pavyzdžiai:

- Vidaus degimo variklyje naudojamas **degalų** ir **deguonies** mišinys gali atlikti darbą.
- Virš **Žemės** paviršiaus pakeltas **kūnas** gali atlikti darbą tam naudojant mechanizmus, kurių veikimas pagrįstas gravitacinės jėgos veikiamo kūno judėjimu žemyn.
- **Judantis kūnas** gali atlikti darbą panaudojant **mechanizmą,** kurio atžvilgiu jo greitis mažėja. Pavyzdžiui, judanti vandens masė gali sukti stacionarų turbinos ratą ir gaminti elektrą. (Tačiau ji negamins elektros, jei turbiną vandens srovė plukdys drauge tuo pačiu greičiu.)

Energijos kiekis priklauso nuo sistemos **būsenos**, pavyzdžiui, nuo to, kokie atstumai yra tarp kūnų arba krūvių, ar kokiu kitokiu būdu šie dydžiai susiję. Atomo fizikoje „būsena" yra dažnai vadinama **energijos lygmeniu.**

Mes retai kada galime išmatuoti visą sistemos energiją. Paprastai matuojame arba energijos *pokytį*, kai sistema pereina iš vienos būsenos į kitą, arba energijos *skirtumą* tarp vienos ir kitos sistemos.

Energijos panaudojimas

Neįmanoma panaudoti visą sistemos energijos pokytį darbui atlikti. Kartais taip yra dėl praktinių ar konstrukcinių priežasčių – dėl trinties ar darbo, atliekamo judinant ne naudingą krovinį, o kitas mašinos dalis. Tačiau yra ir esmingesnių nenašaus darbo priežasčių, pasireiškiančių **šiluminėse mašinose,** kuriose vyksta šilumos pernaša – garo turbinose, automobilių varikliuose. Daugiau apie tai sužinosite 15 skyriuje.

Energijos matavimas

Energijos, kaip ir darbo, matavimo vienetas yra **džaulis** (J). Džaulis – tai toks darbas, kuris atliekamas, kai 1 **niutono** (N) jėgos veikiamas kūnas nueina 1 metro kelią: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$. Energija matuojama tais pačiais vienetais, kadangi ji atspindi gebėjimą atlikti darbą.

Energijos formos

Kasdienėje veikloje kartais yra naudinga išskirti įvairias energijos *formas*, pavyzdžiui, *cheminę* energiją, *branduolinę* energiją, *elektros* energiją, *šiluminę* energiją. Tada kalbame apie „vienos energijos formos virtimą kita". Toks požiūris į energiją ne visada teisingas. Pavyzdžiui, nuodugniau patyrinėję „šiluminę energiją", pastebėtume, kad pakaitinus kietąjį kūną (kai jis „pasidaro karštesnis") jo dalelės intensyviau virpa. Kietuosiuose kūnuose tarp dalelių veikiančios jėgos (ryšiai) išlaiko jas tam tikrose padėtyse ir dalelės virpa apie šias padėtis. Tai reiškia, kad dalelės turi nuolat kintantį potencinės ir kinetinės energijos derinį. Dujose papildoma energija, dėl kurios jos įkaista, pasklinda tarp dalelių kinetinės energijos pavidalu. Pastovios temperatūros kūne dalelių kinetinės ir potencinės energijų suma išlieka pastovi. Ji vadinama **vidine energija.** Jai apibūdinti daugelyje vadovėlių vis dar vartojami terminai *šiluma* arba *šiluminė energija*, bet šie terminai nėra tikslūs.

Štai keletas *pagrindinių* energijos formų:

- **Potencinė energija** – tai energija tokios sistemos, kurioje kūnas yra tam tikros prigimties jėgos lauke ir tas laukas veikia kūną jėga. Gravitacinis laukas veikia pačią masę ir sukuria **gravitacinę potencinę energiją.** Elektriniai laukai veikia elektros krūvius ir sukuria *elektrinę potencinę energiją*. Branduolinės jėgos veikia nuklonus, ir pastarieji įgauna potencinę energiją, dažnai vadinamą *ryšio energija*. Šios energijos rūšys yra nuodugniai išnagrinėtos atitinkamuose skyriuose.
- **Kinetinė energija** – tai stebėtojo atžvilgiu judančios masės energija, matuojama darbu, kurį ši masė gali atlikti stabdoma iki rimties būsenos (t. y. iki to paties greičio, kuriuo juda stebėtojas, paprastai nejudantis Žemės atžvilgiu).
- **Spinduliuotės energija** – tai energija, pernešama elektromagnetinėmis bangomis – erdvėje sklindančiu elektriniu ir magnetiniu lauku. Šią energiją perneša fotonai. Kiekvienas fotonas perneša tam tikrą energijos kvantą ir sklinda šviesos greičiu.

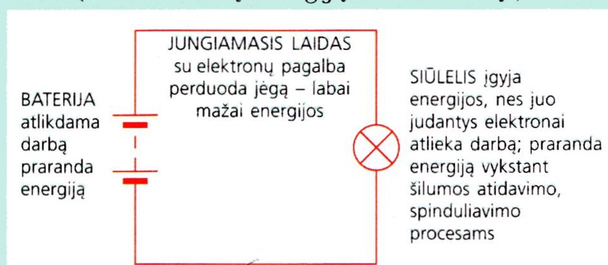
Visas kitas energijos „formas" galima paprasčiau apibūdinti iš esmės šiomis trimis pagrindinėmis energijos rūšimis.

„Perduoti energiją" naudingiau nei ją „konvertuoti"

Daugelyje realių situacijų energija tampa svarbi, kai norime ją **perduoti** iš vienos sistemos į kitą. Dėl to yra svarbu ir naudinga gerai suprasti **energijos perdavimo procesus.**

Elektros perdavimas ar elektros energija?

Geriau ne kalbėti apie „elektros energiją" laide, o tą laidą traktuoti kaip priemonę, kuria naudojantis energija pernešama vykstant **elektros perdavimo** procesui. Panagrinėkime bateriją, sujungtą su žibintuvėlio lempute (žr. E.1 pav.). Bateriją sudarančios cheminės medžiagos turi įelektrintas daleles (jonus), kurios baterijose atskirtos. Taip sukuriamas potencialų skirtumas, vadinasi, ir jėga, verčianti elektronus judėti grandine. Judant elektronams, ta jėga atlieka darbą – stumia juos kitų laidininke esančių elektronų, atomų bei jonų atžvilgiu ir suteikia jiems papildomos kinetinės ir potencinės energijos. Lemputės siūlelis priešinasi elektronų srautui, atliktas darbas didina vidinę energiją, ir siūlelio temperatūra kyla. Ilgainiui siūlelyje nusistovi pusiausvyra: elektrinių jėgų atliktas darbas tampa lygus spinduliuojamai (infraraudonosios spinduliuotės ir regimosios šviesos) energijai. Vykstant cheminėms reakcijoms baterija „eikvojasi", ir bendras potencialų skirtumas mažėja. Atkreipkite dėmesį, kad bateriją su lempute jungiančiu laidu tekantis elektronų srautas „neneša energijos" į lemputę. Nors elektronai chaotiškai juda dideliais greičiais, išilgai laido jie juda labai *mažu* dreifiniu greičiu. Kinetinė energija, kurią jie įgyja dėl šio lėto dreifo, irgi yra labai maža. Elektronų funkcija yra perduoti jėgą, kaip tai daro dviračio grandinė. Ši jėga yra elektrinės prigimties ir todėl gali atlikti darbą, pavyzdžiui, sukti elektros variklį, arba veikdama įelektrintas daleles rezistoriuje versti jas judėti (didinti vidinę energiją arba „šilumą").



Šiluma ir darbas

Energija gali judėti iš vieno kūno į kitą vykstant šiluminiams procesams: **laidumui, konvekcijai, būsenos pasikeitimui** arba **spinduliavimui.** Tai – chaotiniai procesai, kadangi jiems vykstant dalelės medžiagose juda netvarkiai. Palyginkite tai su *darbo atlikimu*, kuris yra tvarkus procesas. Atliekant darbą, jėga tam tikrą objektą veikia aiškiai apibrėžta kryptimi.

Griežtai kalbant, *šildymas* – tai procesas, kuriam vykstant energija vienu iš aukščiau aprašytų būdų perduodama iš karšto kūno vėsesniam. Bet, žinoma, jūs galite kažką įkaitinti ir nechaotiniu būdu – prisiminkite pjaunamą metalo gabalą. Šiuo atveju *atliekamas darbas* (jūs naudojate kryptingą jėgą), tačiau metalas ir pjūklas įkaista. Taip pat ir srovė lemputės siūlelyje atlieka darbą bei jį sušildo. Termino „šildymas" vartojimas šia prasme yra pavyzdys, kaip fizikai įprastam žodyno žodžiui suteikia tam tikrą išskirtinę reikšmę ir tuo būdu studentams sudaro keblumų.

Reziumuojant, kūno **vidinę energiją** galime padidinti suteikdami energijos atliekant **darbą**, o taip pat suteikdami energijos vykstant **netvarkiam šiluminiam procesui dėl temperatūrų skirtumo**. Fizikai pastarąją frazę trumpina iki „šildant". Daugiau apie tai rasite 15 Skyriuje, kur nagrinėjamas ryšys tarp šildymo ir darbo atlikimo disciplinoje, vadinamoje **termodinamika**.

Energijos tvermės dėsnis

Jis teigia, kad bet kurioje uždaroje sistemoje ar sistemų grupėje pilnoji energija išlieka pastovi. Jį galima suformuluoti ir taip:

Energijos neįmanoma nei sukurti, nei sunaikinti.

Tai – vienas iš pačių fundamentaliausių fizikos dėsnių. Jis reiškia, kad, jei sistema praranda kažkokį kiekį energijos, kažkurios kitos sistemos bendroje sumoje turi įgyti lygiai tą patį energijos kiekį.

Šis dėsnis buvo praplėstas atsižvelgiant į idėją, kad masė ir energija yra ekvivalenčios (žr. 26 Skyrių). Taigi, masės pokytis irgi reiškia energijos pokytį, ir atvirkščiai. Šiuos pokyčius sieja formulė $\Delta E = c^2 \Delta m$.

Energijos sąvoką nelengva suprasti, tačiau dažniausiai yra paprasčiau nagrinėti ir aprašinėti procesus, kuriems vykstant atliekamas darbas arba perduodama energija, negu sukti galvą apie tai, kas *yra* energija, ir kokią *formą* ji galėtų įgauti.

E.1 pav. Energija paprastoje grandinėje

4 Niutono dėsnių taikymas



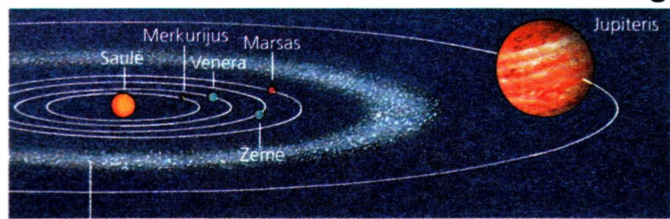
1994 metų liepą Šumakerio-Levi kometos skeveldros atsitrenkė į Jupiterį, planetą, kurios masė daugiau kaip 300 kartų didesnė už Žemės masę. Skeveldros nuo smūgio susprogo, ir viso pasaulio astronomai užregistravo ugnies kamuolius, kylančius per tankią debesuotą atmosferą. Tamsiai rudos dėmės kairėje apačioje matomos skeveldrų susidūrimo vietose.

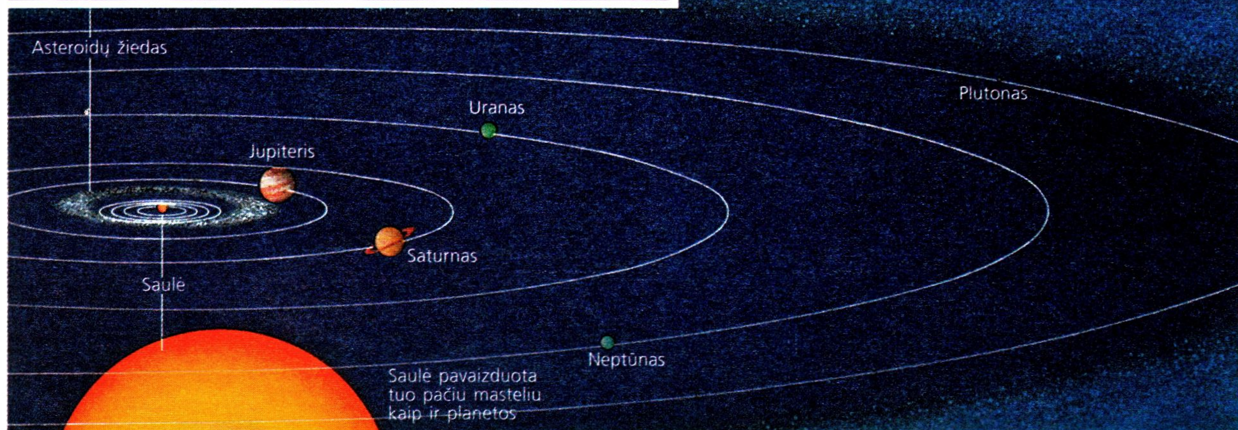
ASTEROIDAI IR KOMETOS labai retai susiduria su Žeme, bet mažesni medžiagos gabaliukai nuolat atkeliauja iš kosmoso. Kasdien Žemės masė padidėja 400 tonų. Tiek metalų, uolienų bei ledo gabalų ir dulkių, išsibarsčiusių „tuščioje erdvėje", patenka į Žemės gravitacijos spąstus ir nukrinta į jos atmosferą.

Meteoritai – iš kosminės erdvės atskriejusio meteorinio kūno liekanos – krinta labai greitai, nuo 10 iki 70 kilometrų per sekundę. Trintis su atmosfera įkaitina juos iki labai aukštos temperatūros, todėl ir regime naktį juos kaip „krintančias žvaigždes". Nedideli, 50 metrų skersmens kūnai krisdami taip įkaista, kad įgytos šilumos pakanka visiškai jiems ištirpti ir išgaruoti viršutiniuose atmosferos sluoksniuose. Galite palyginti: tokio kūno turimas kinetinės energijos kiekis yra toks pat koks išsiskiria sprogus 10 megatonų atominei bombai ($4{,}2 \times 10^{16}$ J).

Masyvūs kūnai susiduria su Žeme maždaug kartą per 100 milijonų metų. Žemė ir kitos vidinės Saulės sistemos planetos patirtų kur kas daugiau susidūrimų, jei nebūtų gigantiškų planetų Jupiterio, Saturno, Urano ir Neptūno, kurių trauka pakeičia didelių kūnų trajektorijas. Pavyzdžiui, 1994 m. Šumakerio-Levi *(Shoemaker-Levi)* kometos skeveldros trenkėsi į Jupiterį. Apskaičiuota, kad jei nebūtų didžiųjų planetų, tai panašūs susidūrimai su Žeme vyktų kas 100 000 metų.

Dideli energijos kiekiai





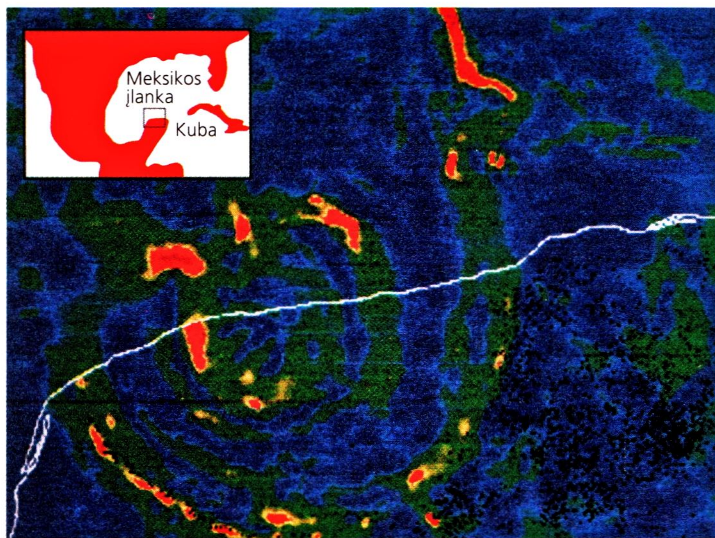
4.1 pav. **Saulės sistema su asteroidų žiedu ir Orto debesiu – medžiagos, iš kurios susidarė planetos, likučiais. (Planetų orbitos atvaizduotos laikantis vienodo mastelio, o planetų dydžiai pavaizduoti kitu masteliu.)**

Galime įsivaizduoti, kad Saulės sistema yra sudaryta iš taisyklingomis orbitomis apie Saulę besisukančių planetų. Be to, nesuskaičiuojama daugybė mažesnių kūnų juda savomis trajektorijomis ir kartais susiduria su planetomis. Tarp tų kūnų yra ir asteroidų, ir mažesnių už juos meteoritų. Asteroidai – tai pasiklydėliai iš asteroidų žiedo, medžiagos masės, pasklidusios tarp Marso ir Jupiterio planetų orbitų (žr. 4.1 pav.).

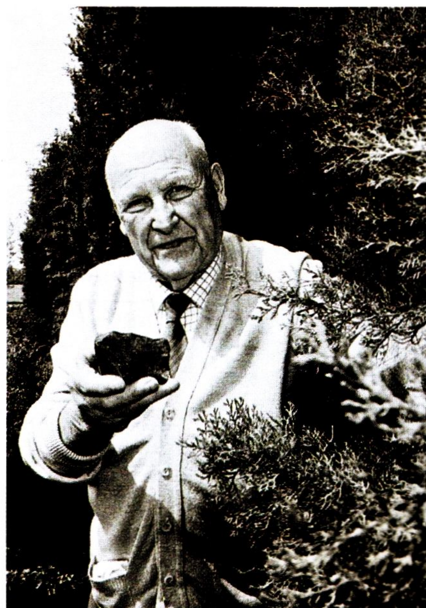
Meteoritus dažniausiai sudaro iš Saulės sistemos tolimiausiuose pakraščiuose esančio Orto debesies atskriejančių kometų skeveldros, sudarytos iš metalų ir uolienų dulkių, įšalusių į ledą, ir sukietėjusių dujų. Dauguma šių kūnų neturi taisyklingų orbitų kaip planetos. Yra daugiau nei 150 asteroidų, kurie vieną gražią dieną gali susidurti su Žeme. Apskaičiuota, kad didžiausiojo iš jų skersmuo lygus 8 km.



4.2 pav. **Didžiuliu greičiu skriejantis meteorinis kūnas įkaista ir išgaruoja dėl trinties su atmosferos dalelėmis. Danguje matomą šviesos ruožą vadiname meteoru**



4.3 pav. **180 km pločio Čikulubo krateris Meksikoje – didžiausias žinomas krateris, susidaręs po susidūrimo su asteroidu. Palaipsniui krateris užsipildė mažesnio tankio nuosėdomis. Jo dydis ir forma įvertinti remiantis gravitaciniais matavimais: mažesnio tankio uolienos pakeičia gravitacinį lauką (jis kitoks nei kalnų, žr. 46 p.) ir pagal jį galima atkurti kraterio vaizdą**



4.4 pav. **1991 metais 0,68 kg meteoritas vos nepataikė į poną Pettiforą iš Peterboro. Vėliau jis padovanojo šį meteoritą Gamtos istorijos muziejui.**

Asteroidui atsitrenkus į Žemės paviršių susidaro krateris, gerokai didesnis už patį asteroidą; iš to galima spręsti apie milžinišką energijos kiekį, išsiskiriantį susidūrimo metu. Pavyzdžiui, 180 kilometrų skersmens Čikulubo krateris Jukatane, Meksikoje (4.3 pav.). Manoma, kad ten nukritusio asteroido masė buvo per 10^{12} tonų, o skersmuo – 10 kilometrų. Jis susidūrė su Žeme prieš 65 milijonus metų, Kreidos geologinės eros pabaigoje. Mokslininkai apskaičiavo, kad jo kinetinė energija turėjo būti maždaug 4×10^{23} J. Tai maždaug tūkstantį kartų daugiau už energijos kiekį, kurį žmonės visame pasaulyje šiais laikais suvartoja per metus (4×10^{20} J).

Čikulubo asteroido smūgis labai pakeitė gyvybės raidą Žemėje. Po tokio stipraus smūgio į atmosferą išmetamas didžiulis kiekis dulkių, kurios ilgus metus gaubia Žemės rutulį ir užstoja Saulės šviesą. Augalai nustoja augti, o jais mintantys gyvūnai žūva. Dinozaurų išnykimas yra geriausiai žinomas reiškinys, kaip manoma, sukeltas Čikulubo asteroido kritimo; taip pat manoma, kad dėl to paties išnyko ir apie pusė jūrinių gyvūnų rūšių. Panašiai dar prieš 160 milijonų metų išnyko 95 procentai jūrinės gyvūnijos, veikiausiai dėl susidūrimo su dar didesniu asteroidu, kurio likučiai aptikti Pietų Atlante.

?

A Iš kur Čikulubo asteroidas įgavo tokia didelę energiją? Ar būtų įmanoma iš anksto pakeisti panašaus į Žemę skriejančio asteroido trajektoriją?

Šiame skyriuje aptariamos sąvokos

Fizika

Norint išsiaiškinti, kokią energiją turi asteroidas, reikia suprasti **kinetinės energijos** ir **potencinės energijos gravitaciniame lauke** sąvokas, taip pat **energijos tvermės dėsnį**.

Jūs ir toliau remsitės **gravitacijos jėgos** samprata ir taikysite tai jėgai atvirkštinio kvadrato dėsnį, kaip buvo aptarta 3 skyriuje. Sužinosite, kaip šios jėgos ir laukai nulemia asteroidų, palydovų ir planetų **judėjimą orbitomis.** Taip pat išsiaiškinsite, kokiu būdu **raketos** gali išvesti į orbitą palydovus, taigi daugiau sužinosite apie **judesio kiekį** ir jo **tvermės dėsnį**.

Matematika

Dažniausiai pakaks paprastų algebros veiksmų. Jūs operuosite dideliais skaičiais, nagrinėsite grafikus ir įsitikinsite grafikų ribojamo ploto svarba. Kartkartėmis prireiks panaudoti integralinį skaičiavimą ir padirbėti su duomenų lentelėmis.

1 ENERGIJA IR DARBAS

Nagrinėjome asteroido – didžiulę energiją turinčio kūno – susidūrimo su Žeme padarinius. Dabar energijos sąvoką panagrinėsime kur kas žemesniame, buitiniame lygmenyje. Energijos sąvoką pagrįsime atliekamu **darbu**, kadangi sistemos energija yra ir apibrėžiama, ir matuojama pagal tai, kokį darbą ta sistema gali atlikti. Žodį „darbas“ fizikai apibrėžia griežčiau nei jo kasdienine prasme. Mes sakome:

Darbas atliekamas tada, kai jėga ką nors pajudina.

Pavyzdžiui, darbas atliekamas, kai:

- naudodami savo raumenų jėgą pakeliate gravitacijos jėgos veikiamą kūną
- pjūklu pjaunate medžio trinką ir savo raumenų jėgą naudojate medienos plaušui suardyti
- elektrinių jėgų veikiami elektronai keliauja rezistoriumi
- slėgio veikiamas vanduo suka hidroelektrinės turbiną
- benzino ir oro mišinys automobilio variklio cilindre sprogsta ir plėsdamasis stumia stūmoklį.

?
Sugalvokite ir užrašykite dar keturis atliekamo darbo pavyzdžius.

Jėgos, neatliekančios darbo

Jūs neatliekate jokio darbo, kai nejudėdami stovite su sunkia kuprine ant pečių. Jūs pavargstate, nes jūsų raumenys yra įtempti. Tačiau jei kuprinė nejuda, tai darbas neatliekamas. Lygiai taip pat jokio darbo neatliks ir stalas, kai, norėdami pailsėti, ant jo padėsite kuprinę.

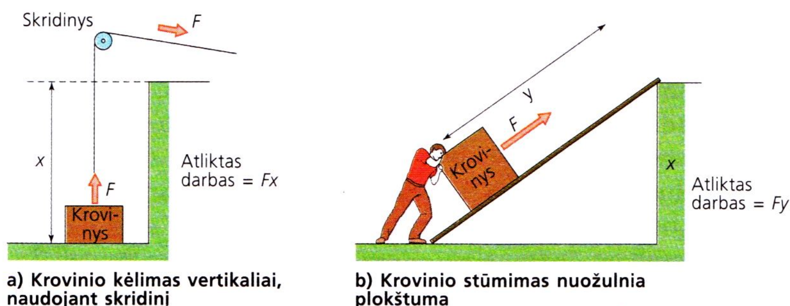
Žr. 1 klausimą.

Darbo formulė

Jėgos atliekamas darbas matuojamas džauliais:

Atliktas darbas (džauliais) = **jėga** (niutonais) × **atstumas, kurį jėgos veikimo kryptimi pajuda kūnas** (metrais)

$$W = Fd$$



a) Krovinio kėlimas vertikaliai, naudojant skridinį

b) Krovinio stūmimas nuožulnia plokštuma

4.5 pav. **Darbas atliekamas, kai veikiant jėgai keliamas krovinys. Šiam darbui atlikti reikalinga jėga *F* priklauso nuo krovinio ir krypties, kuria tas krovinys veikiamas**

Kaip parodyta 4.5 a) ir b) paveiksluose, reikia atsižvelgti į jėgos *F* veikimo ir taško, kurį ta jėga veikia, judėjimo kryptis.

■ Žr. 2 ir 3 klausimus.

PAVYZDYS

K Pirkėja užstumia prekių vežimėlį 4 m ilgio nuožulnia plokštuma į viršų (4.6 pav.). Vežimėlį ji veikia 14 N jėga, nukreipta lygiagrečiai plokštumos paviršiui. Kokį darbą ji atlieka?

A Atliktas darbas (J) = jėga (N) × kelias, nueitas judėjimo kryptimi (m)

= 14 × 4 = 56 N · m (56 J)



4.6 pav. **Vežimėlio stūmimas nuožulnia plokštuma**

2 ENERGIJOS TVERMĖ GRAVITACINIAME LAUKE

Kadangi darbą galima išmatuoti, sistemos energija dažnai išreiškiama darbu, kurį ta sistema atlieka ar gali atlikti. Taigi energiją galima apibrėžti taip:

Sistema turi energijos, jeigu ji gali atlikti darbą.

Tuo remsimės ne tik dabar, bet ir nagrinėdami daugelį kitų temų šioje knygoje.

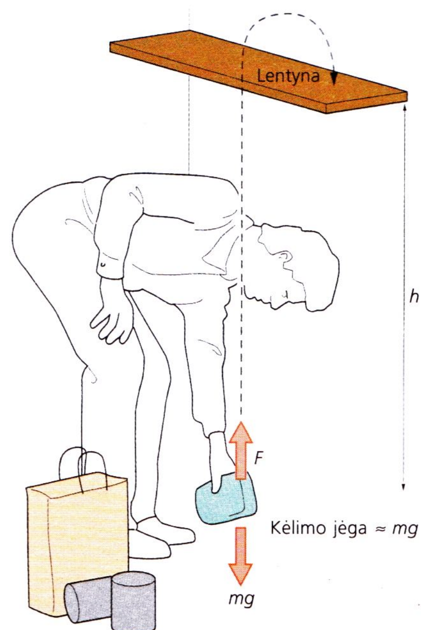
Potencinė energija gravitaciniame lauke

Jei ką nors keliate, tai atliekate darbą. Įsivaizduokite, kad imate nuo grindų cukraus maišelį ir dedate jį ant lentynos (4.7 pav.). Tam jūs turite paveikti maišelį jėga, didesne nei gravitacijos jėga (jo svoris *mg*), ir pakelti jį į aukštį *h*.

Keliant maišelį atliktas darbas = jėga × kelias

$$W = mgh \text{ (džauliais)}$$

Dviejų kūnų sistemoje dėl gravitacijos atsiranda traukos jėgų pora. Tos jėgos yra lygaus dydžio, bet veikia priešingomis kryptimis – Žemė traukia maišelį, o maišelis traukia Žemę. Jei cukraus maišelis pateiktajame pavyzdyje kristų nuo lentynos, abu, ir maišelis, ir Žemė judėtų link vienas kito (tiesa, Žemė pajudėtų labai menkai!).



4.7 pav. **Cukraus maišeliui pakelti reikalinga jėga, šiek tiek didesnė už gravitacijos jėgą**

?

C a) Koks darbas atliekamas 5 kg masės kūną pakeliant į 4 m aukštį?

b) Kokie energijos virsmai vyksta tuo metu, kai kūnas keliamas traukiant už per skridinį permestos virvės?

c) Kodėl energija, galiausiai perduota keliamam kūnui, yra didesnė nei gauta dėl raumenų ląstelėse vykstančių cheminių reakcijų?

Krisdamas cukraus maišelis gali atlikti šiek tiek naudingo darbo. Pavyzdžiui, galėtume trumpam priversti jį sukti generatoriuką ir gaminti elektros srovę mažai elektros lemputei! Stambesniu mastu vandens krioklių energija panaudojama hidroelektrinėse elektrai gaminti.

Taigi galime įsivaizduoti, kad sistema, kurią sudaro Žemė ir ant lentynos gulintis cukraus maišelis, turi „sukaupusi" energijos. Ši energija vadinama **potencine energija** gravitaciniame lauke. Žodis „potencinė" čia panaudotas dėl to, kad ant lentynos gulintis cukraus maišelis neatrodo labai energingai. Tačiau mes žinome, kad jis gali atlikti darbą, jei kristų žemyn. Jau atkreipėme dėmesį į tai, kad darbas atliekamas tada, kai jėga ką nors pajudina. Jei maišelį veikiančios jėgos nenaudojame atlikti darbui (pavyzdžiui, sukti miniatiūrinį generatorių), tada atliktas darbas tiesiog padidins maišelio **kinetinę energiją** – „judėjimo energiją": krisdamas jis judės vis greičiau ir greičiau.

?

D Norint užkelti cukraus maišelį nuo grindų ant 1,8 m aukštyje esančios lentynos reikalinga 10,3 N jėga.

a) Panaudokite sąryšį:

atliktas darbas = jėga × kelias, nueitas jėgos veikimo kryptimi

ir apskaičiuokite atliktą darbą.

b) Neatlikdami jokių papildomų skaičiavimų užrašykite papildomos gravitacinės potencinės energijos, kuri tokiu būdu buvo sukaupta sistemoje Žemė–maišelis, vertę.

c) Kokiu greičiu maišelis atsitrenktų į grindis, jei jis nukristų ir visa papildoma energija virstų kinetine energija?

(Naudokitės kinetinės energijos formule = $\frac{1}{2}mv^2$.)

3 ENERGIJOS TVERMĖS DĖSNIS

Nėra *akivaizdu*, kad darbas, atliekamas dedant cukraus maišelį ant lentynos, yra lygus kėlimo metu sukauptai potencinei energijai, ir kad ši potencinė energija yra lygi kinetinei energijai, kurią jis įgytų vėl krisdamas ant grindų.

Šiaip ar taip, potencinės energijos neįmanoma išmatuoti tiesiogiai. Jei atliktumėte kruopštų eksperimentą ir išmatuotumėte atliktą darbą bei maksimalią įgytą kinetinę energiją, tai tikriausiai gautumėte, kad atliktas darbas tik apytiksliai lygus galutinei kinetinei energijai. Nėra paprasta įvertinti, pavyzdžiui, darbą, atliktą trinčiai nugalėti, arba numatyti eksperimento paklaidas.

Vis dėlto vienas iš fundamentaliųjų mokslo dėsnių teigia, kad:

Energijos neįmanoma nei sukurti, nei sunaikinti.

Devynioliktame šimtmetyje šiuo dėsniu buvo vis dažniau įsitikinama atliekant daug vis tikslesnių eksperimentų, ir mokslininkai palaipsniui pribrendo pripažinti šį dėsnį. Jis tapo žinomas kaip **energijos tvermės dėsnis**.

Kinetinės energijos formulė

Jūs jau naudojote kinetinės energijos formulę:

$$\textbf{Kinetinė energija} = \tfrac{1}{2}\, mv^2,$$

kur kūno kinetinė energija išreiškiama masės ir greičio sandauga. Mes galime išvesti šią formulę nagrinėdami kūno, kurį veikiant buvo atliktas darbas, kinetinę energiją.

4.8 paveiksle pavaizduotas automobilis, kurį verčiant judėti atliekamas darbas, o pats automobilis įgyja greitį, taigi ir kinetinės energijos. Atstojamoji pagreitį suteikianti jėga F veikia masės m automobilį, ir rimties būsenoje buvęs automobilis nuvažiuoja kelią x ir įgyja greitį v.

Atstojamoji pagreitį suteikianti jėga F

Laikas = 0
Greitis = 0



Po laiko t
Greitis v



Kelias x

4.8 pav.

Pagal energijos tvermės dėsnį, atliktas darbas Fx virsta automobilio kinetine energija (jei nepaisysime trinties ir kitų energijos nuostolių):

$$\text{Atliktas darbas} = \text{įgyta kinetinė energija} = Fx = max$$
(kadangi jėga F = masė × pagreitis)

Dabar ax susiekime su greičiu v, pasinaudodami kinetine judėjimo lygtimi kūnui, kurio pradinis greitis lygus nuliui: $v^2 = 2ax$ (žr. pavyzdį 17 p.).

Sukeitę narius gauname: $ax = \frac{1}{2}v^2$

Taigi galime užrašyti:

įgytoji kinetinė energija $= m(ax)$

$= m \times \frac{1}{2}v^2$,

arba: $= \frac{1}{2}mv^2$.

?

E Imkite akmenį, meskite jį vertikaliai į viršų. Jis nusileidžia tiksliai ton pačion vieton, iš kur jūs jį paėmėte.

a) Ar šiuo judesiu jūs perdavėte bent kiek energijos?

b) Kas atsitiko tai energijai?

c) Kokias prielaidas apie energiją jūs turėjote padaryti atsakydami į šiuos klausimus?

■ Žr. 4, 5 ir 6 klausimus.

PAVYZDYS

K 25 kg masės uolienos luitas krinta nuo uolos į 30 metrų žemiau esantį paplūdimį. Kokia jo **a)** kinetinė energija, **b)** greitis prieš pat smingant į paplūdimio smėlį?

A Luito gravitacinę potencinę energiją paplūdimio atžvilgiu prieš krintant galima aprašyti taip:

$$mg\Delta h = 25 \times 9{,}8 \times 30 \text{ (džaulių)} = 7350 \text{ J}$$

a) Energija išlieka tokia pat, todėl, jei nepaisysime trinties su oru, krintančio luito kinetinė energija irgi lygi 7350 J.

b) Todėl: $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 25 \times v^2$

$= 7350$ J

$v^2 = 7350 \times \frac{2}{25}$

Taigi $v^2 = \frac{2 \times 7350}{25}$

$v = 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Luito greitis prieš pat smingant į paplūdimio smėlį = 24 m · s^{-1}

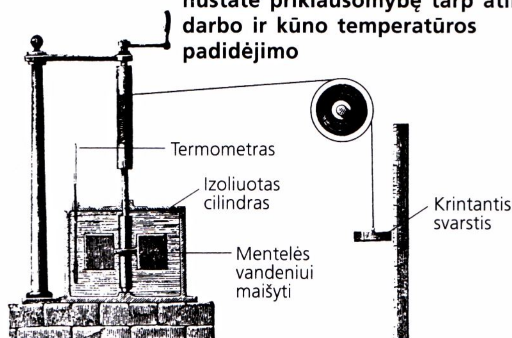
DŽAULIO (*JOULE*) ATLIKTI ŠILUMOS IR ENERGIJOS TYRIMAI

PATIRTIS MUMS SAKO, kad atliekantys darbą kūnai įkaista. Pavyzdys – plaktuku kalamas metalas. Ir atvirkščiai, galime panaudoti karštesnę už aplinką medžiagą, kad atliktume darbą, pavyzdžiui, automobilio variklyje degindami benziną.

Devynioliktajame amžiuje vyko debatai, ar „šiluma yra energijos forma". Šiandien galime sakyti, kad „norint ką nors įkaitinti, reikia suteikti energijos, o šiltesnį už aplinką kūną galima panaudoti darbui atlikti".

Džaulis (*James Prescott Joule,* 1818–1889) buvo mokslininkas mėgėjas ir domėjosi šiluma bei energija. Nuo 1843 iki 1878 metų jis atliko labai kruopščius tyrimus, skirtus patikrinti energijos tvermės dėsniui, taikant jį šilumai ir darbui. Jis siekė įrodyti, kad kai kūną veikiančios trinties jėgos atlieka darbą, kūnas įkaista, ir tarp atlikto darbo ir kūno temperatūros padidėjimo yra tiesioginė priklausomybė.

Savo eksperimentuose Džaulis matuodavo darbą, atliekamą maišant nedidelį kiekį vandens, ir to maišymo sukeltą temperatūros padidėjimą. Krintančio svarsčio sukamas vandenyje ratas su mentelėmis atlikdavo darbą dėl trinties su vandeniu ir šildydavo vandenį. Džaulis įrodė, kad darbas, atliekamas pakeliant svarstį į pradinę padėtį, visada proporcingas „šiluminei energijai", išskiriamai krintančio svarsčio.



4.9 pav. **Šiuo prietaisu tirdamas vandens atliekamą darbą Džaulis nustatė priklausomybę tarp atlikto darbo ir kūno temperatūros padidėjimo**

Tuo metu „šiluma" buvo matuojama ne džauliais, o kalorijomis – vienetais, kurie ir šiandien rašomi ant maisto produktų pakuočių. Dabar Džaulio tyrimus primena jo vardu pavadintas energijos vienetas.

Energijos tvermės dėsnis, teigiantis, jog energijos neįmanoma sukurti ar sunaikinti, dabar yra laikomas vienu iš fundamentaliųjų materialaus pasaulio dėsnių. Albertas Enšteinas (*Einstein*) jį praplėtė idėja, kad masė yra energijos forma.

4 ENERGIJOS TVERMĖ GRAVITACINIAME LAUKE

Gravitacinė potencinė energija vienalyčiame lauke

Kaip matėme, gravitacinę potencinę energiją galima išmatuoti darbu, kuris atliekamas perkeliant kūną priešinga gravitacinio lauko jėgai kryptimi, t. y. aukštyn (žr. 4.7 pav.).

Gravitacinės potencinės energijos pokytis = darbui, atliekamam perkeliant kūną priešinga gravitacijos jėgai kryptimi

$$\Delta E = \text{gravitacijos jėga} \times \text{kelias}$$

arba

$$\Delta E = mg\Delta h$$

Ši formulė gravitacinės potencinės energijos pokyčiui aprašyti teisinga tik tada, kai gravitacinio lauko stipris g pastovus visame intervale Δh.

PAVYZDYS

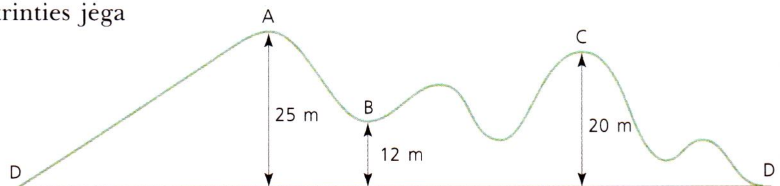
K Pramogų parke įrengtuose amerikietiškuose kalneliuose (žr. 4.10 pav.) vagonėliai rieda bėgiais, kurie prasideda ir baigiasi taške D. Vagonėlis užtraukiamas iš taško D į aukščiausią bėgių vietą (tašką A) ir paleistas žemyn rieda veikiamas gravitacijos iki to paties taško D.

a) Kokiu greičiu važiuotų vagonėlis, jei trinties jėga jo neveiktų šiuose maršruto taškuose:

taške B;

taške C;

taške D?



b) Iš tikrųjų riedančio vagonėlio greitis mažėja dėl jį veikiančios trinties, ir į tašką D jis nusileidžia $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ greičiu (čia jį tenka sustabdyti). Kokia taške A turėtos energijos dalis prarandama dėl trinties?

A

a) Į visus šioje dalyje pateiktus klausimus galima atsakyti remiantis energijos tvermės dėsniu – tiesiog reikia nustatyti potencinės ir kinetinės energijos pokyčius. Mums nereikia žinoti, kaip kinta jėgos judant vagonėliui. Netgi nereikia žinoti vagonėlio masės, nes ji išlieka pastovi per visą kelionę ir skaičiavimuose susiprastina, kaip matyti pirmajame sprendime.

Greitis taške B

Kinetinės energijos prieaugis = potencinės energijos sumažėjimui

$\frac{1}{2}mv^2 = mg\Delta h$ (kur $g = 9{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

$v^2 = 2g\Delta h$ (kur $\Delta h = 25 - 12 = 13$ m).

$v^2 = 2 \times 9{,}8 \times 13 = 254{,}8$,

taigi $v = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Greitis taške C

Potencinė energija taške C sumažėja dėl aukščių skirtumo taško A atžvilgiu (5 m).

(Įsitikinkite, kad greitis taške C yra šiek tiek mažesnis nei $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.)

Greitis taške D

Čia aukščių skirtumas lygus 25 m. Taigi pasinaudojus

$$v^2 = 2g\Delta h,$$
$$v^2 = 2 \times 9{,}8 \times 25,$$
$$v = 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b) Energijos nuostoliai dėl trinties

Iki stabdymo pradžios vagonėlis judėjo $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ greičiu.

Taigi masės vieneto (t. y. tarus, kad $m = 1$) kinetinė energija $\frac{1}{2}mv^2$ iki stabdymo yra tokia:

$$0{,}5 \times 10^2 = 50 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Teorinę vagonėlio kinetinės energijos vertę nustatykime atmesdami trinties poveikį. Tada kinetinės energijos prieaugis masės vienetui lygus potencinės energijos $mg\Delta h$ sumažėjimui, tenkančiam masės vienetui:

$$9{,}8 \times 25 = 245 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Vadinasi, vagonėlio masės vienetui tenkantys energijos nuostoliai dėl trinties yra tokie:

$$245 - 50 = 195 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Kelionės metu prarastos energijos dalis

$$= 195/245 = 0{,}80.$$

Ši formulė gana tiksliai aprašo arti Žemės paviršiaus esančių kūnų judėjimą, tačiau negalės būti taikoma, kai kūnai nutolę maždaug Žemės spinduliui prilygstančiu atstumu, jau nekalbant apie atstumus Saulės sistemoje. Šį klausimą vėliau aptarsime nuodugniau.

Iki šiol sprendėte gana sudėtingus dinamikos ir kinematikos uždavinius remdamiesi jėgos, masės ir pagreičio sąvokomis bei judėjimo dėsniais. Tokią metodiką patogu taikyti tada, kai kūną veikiančios jėgos yra pastovios ir kūnai juda tolygiai greitėdami arba lėtėdami. Tačiau dažnai tikroviškos situacijos nėra tokios paprastos, todėl sprendžiant uždavinius paprastai patogiau remtis energijos tverme, parodyta ankstesniame puslapyje pateiktame pavyzdyje.

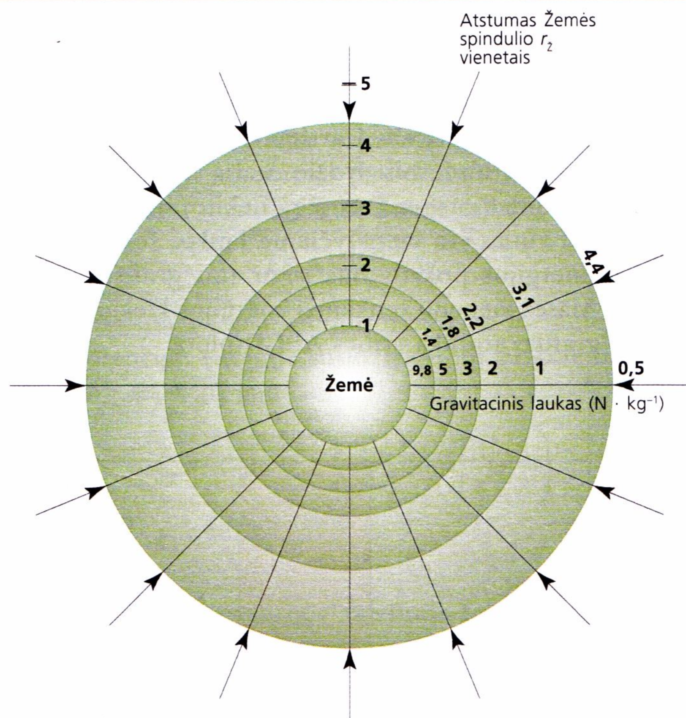
5 GRAVITACINĖ POTENCINĖ ENERGIJA ŽEMĖS LAUKE

Kaip jau aiškinta 3 skyriuje, kūno gravitacinio lauko stipris kinta atitinkamai jo atstumui nuo žemės, t. y. didėja atvirkščiai proporcingai atstumo kvadratui. Žemės **gravitacinis laukas yra radialusis** (tai pavaizduota 4.11 pav.). Kai atstumas nuo Žemės paviršiaus nedidelis, gravitacinis laukas kinta nežymiai, ir jo pokyčių galima nepaisyti. Todėl esant nedideliam atstumui lauką laikome vienalyčiu. 4.1 lentelėje sugretintos atitinkamos formulės. G yra universalioji gravitacijos konstanta (žr. 3 skyrių), M – Žemės masė. Kai kurias iš šių lygčių dar reikia paaiškinti.

Universalioji gravitacijos konstanta G yra lygi $6{,}67 \times 10^{-11}$ N · m² · kg⁻²; Žemės masė $M = 5{,}98 \times 10^{24}$ kg

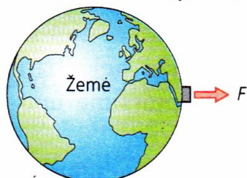
4.1 lentelė

	Vienalytis laukas	Radialusis laukas
Jėga	$F = mg$	$F = -GMm/r^2$
Gravitacinės potencinės energijos pokytis	$mg\Delta h$	$GMm(1/r_1 - 1/r_2)$
Gravitacinis potencialas	(nesvarbi sąvoka, kai laukas yra vienalytis)	$-GM/r$



4.11 pav. **Radialusis Žemės gravitacinis laukas. Pavaizduota, kaip laukas kinta didėjant atstumui nuo Žemės paviršiaus. Radialios linijos vaizduoja jėgų linijas, o apskritiminės linijos atitinka pastovų gravitacinį lauką**

Kūnas ant Žemės paviršiaus **Kūnas begalybėje**



Norint pakelti kūną nuo Žemės paviršiaus, reikia paveikti jį jėga, todėl perkeliant jį į be galo toli esantį tašką reikia atlikti darbą

Kūną veikianti jėga lygi nuliui, taigi ir jo potencinė gravitacinė energija yra lygi nuliui

4.12 pav. **Kūno gravitacinė potencinė energija begalybėje ir Žemės paviršiuje**

„Neigiama energija“ – labai naudinga idėja!

Prieš pradėdami detaliai nagrinėti radialųjį lauką turime išsiaiškinti vieną dalyką, kuris dažnai kelia nesusipratimus – *gravitacinės potencinės energijos neigiamą ženklą.*

Įsivaizduokite m masės kūną, esantį tuščioje erdvėje be galo dideliu atstumu r_∞ nuo bet kurio kito kūno. Radialiajame lauke veikianti jėga GMm/r_∞^2. Kadangi nagrinėjamuoju atveju r_∞ yra lygus begalybei, tai šį kūną veikianti jėga bus lygi nuliui. Kūnas negalės „kristi“ link ko nors, vadinasi, jis neturi potencinės energijos; taip pat jis negalės įgyti kinetinės energijos ar atlikti darbo. Todėl sakoma, kad jo *gravitacinė potencinė energija yra lygi nuliui.*

Dabar įsivaizduokite tą patį kūną Žemės paviršiuje. Norint perkelti jį į begalybę (kur neveiktų nei Žemės, nei bet kokio kito kūno gravitacinis laukas) tektų *suteikti* jam energijos – kinetinės energijos, jei, tarkim, gabentume jį raketa. (Mes dar apskaičiuosime, kiek energijos tam prireiktų.) Tačiau kai tas kūnas jau bus perkeltas be galo toli, jo gravitacinė potencinė energija, žinoma, bus lygi nuliui.

Vienintelis būdas „suvesti galus“ (ir taip išlaikyti nepažeistą energijos tvermės dėsnį) – sutarti, kad Žemės paviršiuje esantis kūnas turėjo *neigiamą* energiją, ir, perkeliant jį į begalybę (kur jo energija lygi nuliui), reikėjo suteikti jam tokį patį kiekį *teigiamos* energijos:

šiek tiek teigiamos kinetinės energijos + toks pats kiekis neigiamos potencinės energijos = nulinė energija

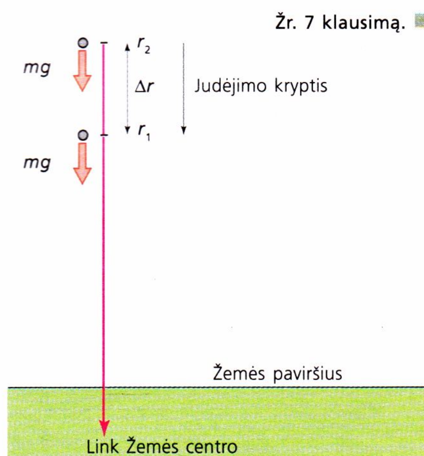
> **?**
>
> **F a)** Krintantys žemėn kūnai praranda potencinę energiją ir įgyja kinetinės energijos. Ar tai reiškia, kad jei kūnas juda gravitaciniame lauke, tai kinetinės energijos pokyčio ženklas visada yra priešingas potencinės energijos pokyčio ženklui? (Pasinaudokite aiškiau pateikta žodine formule.)
>
> **b)** Kūnas nukrito iš taško A į tašką B. Kritimo metu jis įgijo 50 kJ kinetinės energijos. Kiek gravitacinės potencinės energijos (GPE) kūnas turėjo taške A, jei taške B jo GPE buvo lygi 5000 kJ?

Kaip rasti gravitacinę potencinę energiją radialiajame lauke

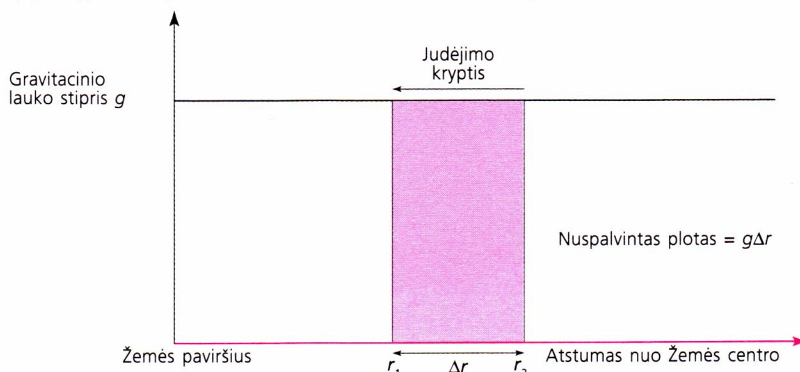
Žr. 7 klausimą.

4.13a) pav. pavaizduotas m masės kūnas, nutolęs atstumu r_2 nuo Žemės centro. Jis perkeliamas į artimą tašką r_1, kurio atstumas iki Žemės centro yra mažesnis dydžiu Δr.

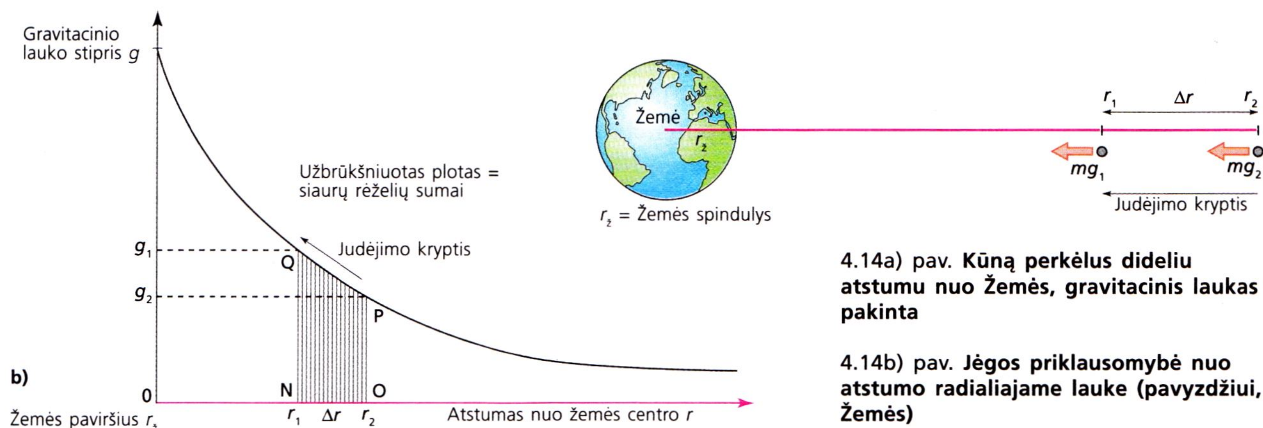
Tarkime, šį nedidelį atstumą Δr jėga nekito, nes praktiškai galime sakyti, kad kūnas yra **vienalyčiame lauke.** Todėl potencinės gravitacinės energijos pokytis bus $mg\Delta r$ (tai grafiškai parodyta 4.13b) pav.). Masės vienetui tenkantis energijos kiekio pokytis yra lygus $g\Delta r$ ir grafike atitinka srities ABCD plotą.



4.13a) pav. **Arti Žemės paviršiaus esantis kūnas perkeliamas mažu atstumu, kurio ribose gravitacinis laukas nekinta**



4.13b) pav. **Jėgos priklausomybė nuo atstumo vienalyčiame lauke**



4.14a) pav. **Kūną perkėlus dideliu atstumu nuo Žemės, gravitacinis laukas pakinta**

4.14b) pav. **Jėgos priklausomybė nuo atstumo radialiajame lauke (pavyzdžiui, Žemės)**

Įsivaizduokite daug didesnius atstumus, tokio masto, kaip pavaizduota 4.14a) paveiksle. 4.14b) pav. parodyta, kaip kinta lauko stipris – mažėja didėjant atstumui nuo Žemės. Taigi jei kūnas perkeliamas iš taško r_2 į tašką r_1, tad jį veikianti gravitacijos jėga padidėja. Potencinės energijos pokytį masės vienetui grafike atspindi plotas NOPQ.

Žr. 8 klausimą.

Gravitacinės potencinės energijos skaičiavimas

1. Grafiškai ir skaitmeniškai

Gravitacinės potencinės energijos pokytį galime rasti 4.14b) pav. grafike suskaičiavę užbrūkšniuotoje srityje esančių mažų ruoželių plotus. Tai varginantis darbas! Galime susumuoti juos skaitmeniškai, pasinaudodami dinamine duomenų lentele. Tai galite pabandyti – atlikite šio skyriaus gale pateiktą užduotį.

2. Algebriškai, naudojant integralinį skaičiavimą

4.14b) paveiksle apibrėžtą plotą PQNO lengviau apskaičiuoti naudojantis paprasta formule. Šią formulę gausime naudodamiesi integraliniu skaičiavimu, taip pat atsižvelgdami į tai, kad, kai atstumai dideli, g didėja atvirkščiai proporcingai atstumo r kvadratui. Gravitacinę potencinę energiją žymėsime simboliu E_p.

Gravitacinės potencinės energijos pokytis ΔE_p aprašomas naudojantis darbo apibrėžimu (jėga × kelias). Įgyta potencinė energija yra lygi darbui, kuris atliekamas perkeliant masės m kūną atstumu Δr tarp taškų, kurių nuotoliai nuo Žemės centro yra r_2 ir r_1.

Taigi
$$\Delta E_p = -\frac{GMm}{r^2}\Delta r.$$

Kaip paaiškinta 64 psl., minuso ženklas formulėje užrašytas tam, kad potencinė energija susibalansuotų su kinetine.

Suintegravę šią lygtį gauname:

$$E_p = -GMm\int_{r_2}^{r_1}\frac{1}{r^2}\mathrm{d}r = GMm\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{r_1}\right)$$

Iš čia:
$$E_p = \frac{GMm}{r_2} - \frac{GMm}{r_1}$$

Tai yra **potencinės energijos skirtumo formulė,** kur E_p yra potencinės energijos sumažėjimas – įgytoji kinetinė energija – kai masės m kūnas perkeliamas iš taško, nutolusio nuo Žemės centro atstumu r_2, į tašką, nutolusį atstumu r_1.

6 GRAVITACINIS POTENCIALAS

Gravitacinį lauką tam tikrame taške yra patogu apibūdinti **gravitaciniu potencialu.** Vartodami šią sąvoką galime apskaičiuoti, tarkime, energijos pokytį arba darbą, kai palydovas pereina iš vienos orbitos į kitą. Gravitacinį potencialą galima palyginti su elektriniu potencialu, o apibrėžiamas jis taip:

Gravitacinis potencialas tam tikrame taške yra lygus energijos pokyčiui, tenkančiam masės vienetui, kai bet koks kūnas perkeliamas iš begalybės į tą tašką.

Jei imsime r_2 = begalybei, $r_1 = r$, o m = 1 kg, tai potencinės energijos pokyčio formulė bus paprastesnė:

$$-\frac{GM}{r}$$

Aprašydami Žemės lauką, pagal šią formulę galime apskaičiuoti potencialą taške, nutolusiame atstumu r nuo Žemės centro.



G Gravitacinis potencialas Žemės paviršiuje randamas įrašius į formulę $-GM/r_ž$ tokias vertes:

Žemės $GM = 4{,}0 \times 10^{14}$ N · m² · kg⁻¹,

Žemės spindulys $r_ž = 6{,}38 \times 10^6$ m.

Įsitikinkite, kad šio skaičiavimo rezultatas yra $-6{,}3 \times 10^7$ J · kg⁻¹.

PAVYZDYS

Energija, kurią įgyja į Žemę krintantis asteroidas

K Įvertinkite su Žeme susiduriančio asteroido kinetinės energijos dydį.

A Tarkime, kad asteroidas yra sudarytas iš uolienos, kurios tankis yra 3000 kg · m³, o jo skersmuo lygus 10 km. Taigi asteroido masė yra maždaug $1{,}6 \times 10^{15}$ kg.

Taip pat tarkime, kad jis krinta iš begalybės, t. y. iš ten, kur gravitacinis potencialas lygus nuliui. Pasiekęs Žemės paviršių jis atsiduria taške, kuriame gravitacinis potencialas lygus $-GM/r_ž$. Kitaip sakant, vienam jo kilogramui tenkanti potencinė energija sumažėja dydžiu $GM/r_ž$.

Gravitacinio potencialo (masės vienetui tenkančios energijos) sumažėjimas:

$$= -\frac{GM}{r_ž} = -\frac{(6{,}7\times10^{-11})\times(6{,}0\times10^{24})}{6{,}4\times10^6}$$

$$= -6{,}3\times10^7 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$$

Akivaizdu, kad ši energija virto kinetine energija. Todėl visa asteroido kinetinė energija lygi potencinei energijai, kurios neteko visa jo masė ($1{,}6 \times 10^{15}$ kg):

KE prieaugis = GPE (gravitacinis potencialas × masė) sumažėjimas

$= 6{,}3 \times 10^7$ (J · kg⁻¹) × $1{,}6 \times 10^{15}$ (kg)

$= 1{,}0 \times 10^{23}$ J

Pagal kinetinės energijos formulę galime apskaičiuoti jo greitį prieš pat susidūrimą su Žeme:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = 1{,}0\times10^{23}$$

$$v^2 = \frac{2\times E_K}{m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\times10^{23}}{1{,}6\times10^{15}}} = 11{,}2\times10^3 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Taigi asteroido greitis prieš susidūrimą lygus 11,2 km · s⁻¹.

Meteoritai dažniausiai įskrieja į Žemės atmosferą maždaug 20 km · s⁻¹ greičiu. Tai beveik dukart daugiau nei apskaičiavome pateiktame pavyzdyje. Šis skirtumas atsiranda dėl to, kad dar prieš pradėdami kristi link Žemės meteoritai jau juda, o ir pati Žemė juda. Taip pat neatsižvelgėme į labai stiprų Saulės gravitacinį poveikį.



H Pagalvokite, kokios praktinės problemos galėtų kilti, jei visą energiją, reikalingą, kad kosminis laivas galėtų ištrūkti iš Žemės gravitacinio lauko, suteiktume iš karto jam startuojant nuo Žemės paviršiaus.

7 ANTRASIS KOSMINIS GREITIS

Panagrinėję pateiktą pavyzdį matytume, kad ant Žemės esančiam kūnui reikia *suteikti* tam tikrą kiekį kinetinės energijos, kad jis galėtų visiškai palikti Žemę. Kad pasiektų begalybę, kur Žemės gravitacinis laukas jo neveikia, kiekvienam to kūno masės kilogramui reikėtų suteikti $6{,}3 \times 10^7$ J kinetinės energijos. Tuomet neigiama

gravitacinio potencialo (jo GPE masės vienetui) vertė $-GM/r_{\check{z}}$, kurią jis turėjo būdamas ant Žemės paviršiaus, sumažėtų iki nulio.

Naudodamiesi kinetinės energijos formule patikrinkite akivaizdų faktą, jog tam, kad kūnas galėtų ištrūkti iš Žemės traukos lauko, kiekvienam jo masės kilogramui reikia suteikti tiek energijos, kad jos pakaktų įgyti 11,2 km · s^{-1} greitį, žinoma, reikiama kryptimi. Šis greitis yra vadinamas **antruoju kosminiu greičiu.**

?

I Neutroninės žvaigždės masė lygi 4×10^{30} kg, o jos spindulys – 10 km. Įsitikinkite, kad antrasis kosminis greitis šioje žvaigždėje prilygsta maždaug dviem trečdaliams šviesos greičio.

■ Žr. 9 klausimą.

PAVYZDYS

K Mėnulio masė lygi $7,3 \times 10^{22}$ kg, o spindulys – $1,7 \times 10^{6}$ m. Koks būtų antrasis kosminis greitis kūnui, esančiam Mėnulyje?

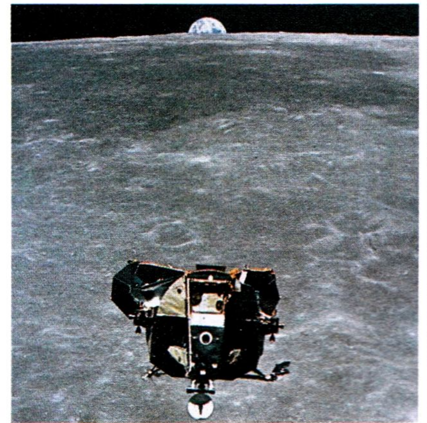
A Gravitacinis potencialas Mėnulio paviršiuje yra lygus:

$$-\frac{GM}{r_{\check{z}}} = -\frac{(6,7\times10^{-11})\times(7,3\times10^{22})}{1,7\times10^{6}}$$
$$= -2,88\times10^{6}\ \mathrm{J\cdot kg^{-1}}$$

Kad kūnas įveiktų Mėnulio gravitacinę trauką, kiekvienam jo masės vienetui turi būti suteiktas ekvivalentus kinetinės energijos kiekis. Taigi vienam kilogramui tenkanti kinetinė energija turi būti lygi:

$$\frac{1}{2}v^2 = 2,88\times10^{6}$$
$$v = \sqrt{2\times2,87\times10^{6}}$$

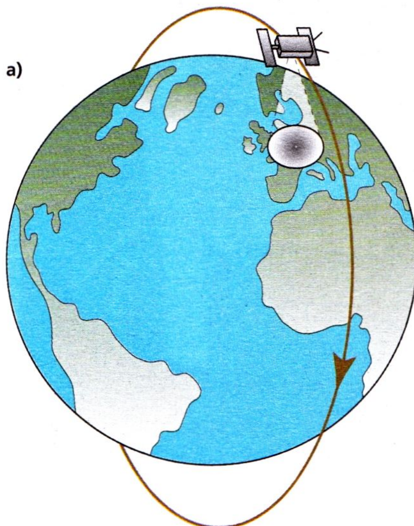
Antrasis kosminis greitis $v = 2,4 \times 10^{3}$ m · s^{-1}

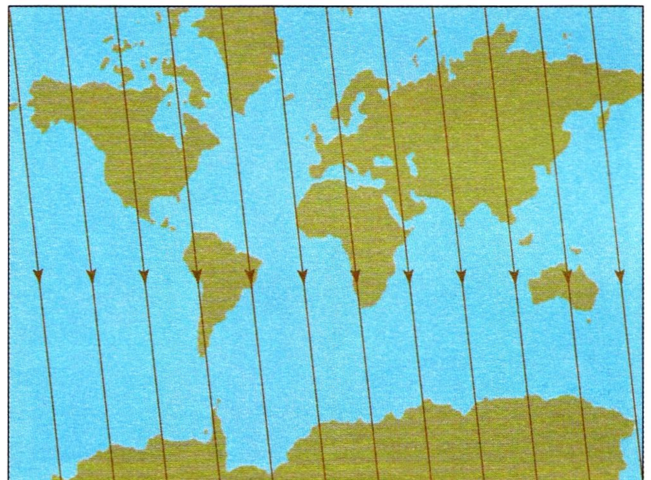


4.15 pav. **NASA Mėnulio modulis pakyla nuo Mėnulio paviršiaus susitikimui su komandiniu moduliu**

8 JUDĖJIMAS ORBITA

Paprasčiausia Žemės palydovo orbita yra apskritiminė, kurios centras sutampa su Žemės centru. Žemės paviršiui žvalgyti skirti palydovai dažniausiai skrieja **viršpoline orbita,** parodyta 4.16a) pav. Palydovas skrieja savo orbita, Žemė po juo sukasi savo ruožtu. Taigi palydovas apsisuka aplink Žemę per 2 valandas, tai visą Žemę jis išžvalgys per 12 apsisukimų, kaip parodyta 4.16b) pav.





4.16 pav. **Iš viršpoline orbita skriejančio palydovo galima stebėti visą po juo besisukančią Žemę**

ŽEMĖS PALYDOVAI – TOLIVEIKĖS AKYS IR AUSYS

SUMAŽĖJUS ŽEMĖS palydovų paleidimo į orbitą išlaidoms, įprastinių ryšių ir informacinėse sistemose kilo tikra revoliucija. Savo televizorių ekranuose dabar galime stebėti, kaip klostosi įvykai atokiausiose pasaulio dalyse būtent tuo metu, kai tai vyksta. Visa, ko reikia naujienų reporteriui, – tai maža veidrodinė antena bei nešiojamasis energijos šaltinis, ir dar galimybė susisiekti su **ryšių palydovu.** Šie palydovai skrieja aukštai, **geosinchroninėmis** orbitomis virš pusiaujo.

Ryšių palydovais taip pat perduodami tarptautiniai telefono pokalbiai, ir jų perduodamo garso kokybė kur kas geresnė nei perduodant radijo ryšio ar antžeminių linijų sistemomis. (21 skyriuje „Ryšių priemonės" aprašyta, kaip informacija siunčiama radijo bangomis tarp palydovų ir antžeminių stočių, ir supažindinama su skaitmenine technologija, kuri įgalina tuo pat metu perduoti milžinišką skaičių žinučių.)

Iš **meteorologinių palydovų** gaunamos debesų sistemų nuotraukos, kurias matome per televizijos orų prognozių laidas. Šie palydovai skrieja viršpolinėmis orbitomis ir daug arčiau Žemės paviršiaus nei geosinchroniniai palydovai. Matuoti sausumos ir vandens telkinių temperatūras bei prognozuoti klimato pokyčius ir šiltnamio efekto tendencijas tapo žymiai patikimiau naudojant meteorologinius palydovus. Būtent iš britų palydovo, kuris rinko duomenis virš Antarktidos, buvo gauti pirmieji įrodymai, kad ozono sluoksnyje atsiranda „skylė".

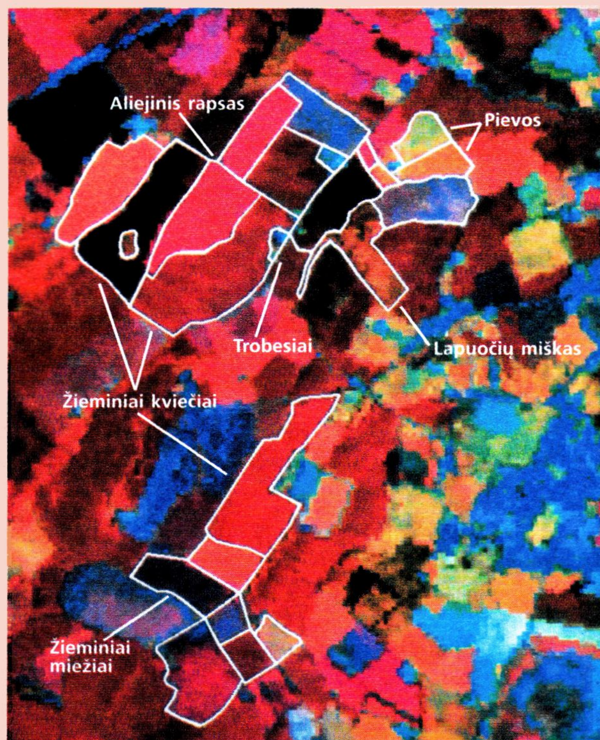
Palydovus susiejus su kompiuteriais Žemėje galima labai tiksliai nustatyti palydovų padėtis. Kita vertus, palydovai tiksliai nustato objektų Žemės paviršiuje padėtis. Laivai ir lėktuvai, nustatydami savo koordinates, jau seniai pasikliauja **navigaciniais palydovais.** Kuriamos navigacinių palydovų duomenis apdorojančios antžeminės sistemos, kurios automobilių vairuotojams teiks informaciją apie jų tikslias koordinates ir rekomenduos maršrutus, kuriuos reikėtų pasirinkti norint išvengti transporto kamščių.

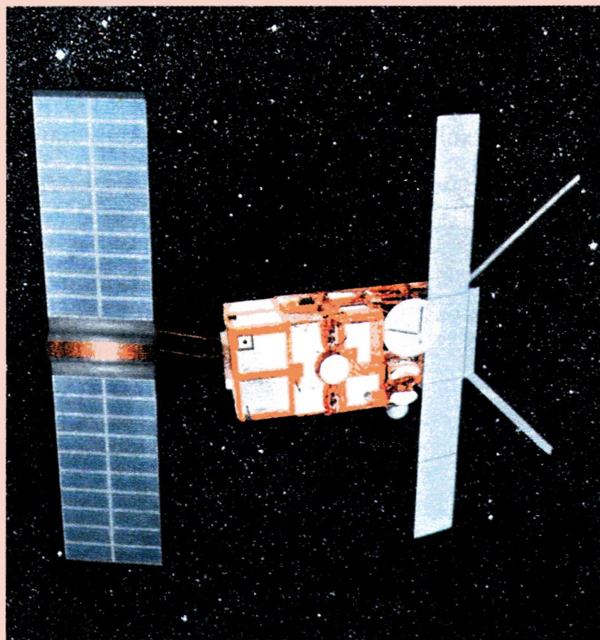
Kariniai palydovai seka laivų, kariuomenės ir transporto priemonių judėjimą. Jie gali nustatyti, kada šaudoma, gali pasiklausyti pokalbių, kurie vyksta naudojantis įvairiomis elektroninėmis ryšių sistemomis.

Infraraudonieji palydoviniai jutikliai, naudojami grunto ir vandens temperatūrai matuoti, taip pat gali stebėti javų augimą, nustatyti, ar javai sveiki, ar apnikti ligų, ar jiems trūksta, pavyzdžiui, vandens. Europos Sąjungoje stebimos žemės ūkio naudmenos ir tikrinama, ar žemdirbiai, kuriems valstybė moka už tai, kad palieka nedirbamus žemės plotus, iš tikrųjų tuose plotuose nieko neaugina.

Palydovai išvedami į orbitą arba vienkartinio naudojimo raketomis, tokiomis kaip Europos *Ariane* (žr. 72 psl.), arba daugkartinio naudojimo erdvėlaiviais *Space Shuttle* (JAV). Vis daugiau šalių siunčia į orbitas savo palydovus savoms reikmėms, pavyzdžiui, meteorologiniams stebėjimams atlikti, taip pat ir komercijos tikslais – tam kad išnuomotų palydovinę įrangą tyrimo ir ryšių organizacijoms, pavyzdžiui, universitetams ar televizijos kompanijoms.

4.17a) pav. **Bedfordširo grafystėje esančio ūkio infraraudonasis palydovinis vaizdas, pagal kurį galima nustatyti, kokios ten auginamos kultūros. Nuotrauka padaryta iš *Lansat* palydovo, skriejančio 705 km aukštyje**

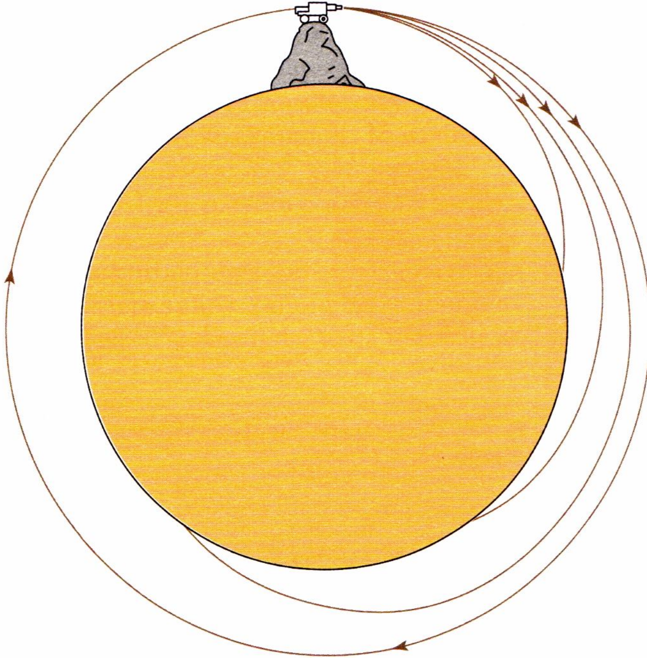




4.17b) pav. **Europos nuotolinės žvalgos palydovas ERS1 stebi Žemės paviršiaus darinius, pakrantes ir vandenynų sroves (gali aptikti naftos dėmes), javų ir laukinių augalų augimą, žvalgo ir kartografuoja poliarinius ledynus**

Niutonas teoriškai paaiškino, kaip kūnas, dideliu greičiu iššautas iš Žemės, gali tapti orbita skriejančiu palydovu. Jis įsivaizdavo ant kalno stovinčią patranką, kuri lygiagrečiai Žemės paviršiui iššauna sviedinius vis didesniu greičiu. Sviediniai lekia kreiva trajektorija kaskart vis toliau. Niutonas įsivaizdavo, kad kurio nors sviedinio kreiva trajektorija pagaliau atitiks Žemės paviršiaus kreivumą, ir *tada sviedinys skries orbita.*

Prisiminkite, kad sakoma, jog kūnas juda su pagreičiu, kai kinta jo greičio absoliutinė vertė arba kryptis, arba ir viena ir kita.



4.18 pav. **Izaoko Niutono patrankos sviedinys, skriejantis orbita. Savo knygoje *Pasaulio sandara* Niutonas rašė: „Kuo didesniu greičiu [patrankos sviedinys] yra iššaunamas, tuo toliau jis nulėks prieš nukrisdamas ant Žemės. Todėl galime įsivaizduoti, kad jis nuskries 1, 2, 5, 10, 100, 1000 mylių lanką ir nukris ant Žemės, kol pagaliau, nuskriejęs už Žemės ribų, jis turėtų išlėkti į erdvę jos neliesdamas."**

Žinoma, būtent gravitacijos jėga, veikianti patrankos sviedinį, verčia jį kristi žemėn. Ši jėga veikia ir orbita skriejantį sviedinį. Jo judėjimo sparta gali būti pastovi, tačiau greitis nuolatos kinta, nes visą laiką kinta sviedinio judėjimo *kryptis*. Suteikdama kūnui į Žemės centrą nukreiptą pagreitį, gravitacijos jėga sukelia jo laisvą kritimą.

Visi orbita skriejantys palydovai yra laisvojo kritimo būsenoje. Jų pagreitis lygus g vertei tame nuotolyje nuo Žemės ir nukreiptas į Žemės centrą.

Žinoma, palydovo greitis turi būti kaip tik toks, kad palydovas išsilaikytų apskritiminėje orbitoje. Jei greitis per mažas, palydovas nukris ant Žemės kaip „nelaimingas" patrankos sviedinys 4.18 paveiksle. Jei greitis per didelis, tai palydovo orbitos spindulys didės, arba orbita virs elipsine. Per dideliu greičiu skriejantis palydovas gali visiškai palikti Žemės orbitą.

J a) Nurodykite, kokie iškiltų sunkumai, jei taikytume Niutono patrankos metodą palydovui paleisti nuo aukšto kalno viršūnės. (Tarkim, kad iššautas sviedinys judėdamas nesusidurs su kliūtimis.)

b) Kokį greitį reikėtų suteikti palydovui, jei jis iššaunamas horizontaliai?

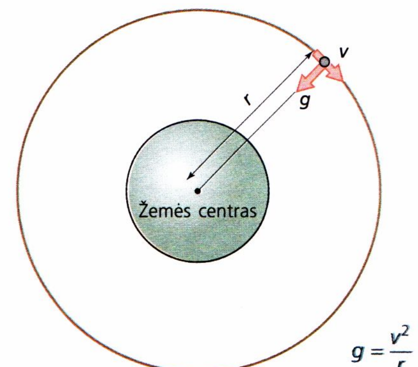
(Žemės spindulys = $6{,}4 \times 10^6$ m)

Greitis ir orbitos spindulys

Kaip parodyta sekančiame puslapyje esančioje paryškintoje srityje ir 4.19 pav., *apskritimine* orbita skriejantis palydovas juda su įcentriniu gravitaciniu pagreičiu g, kuris šitaip susijęs su palydovo greičiu v:

$$g = v^2/r,$$

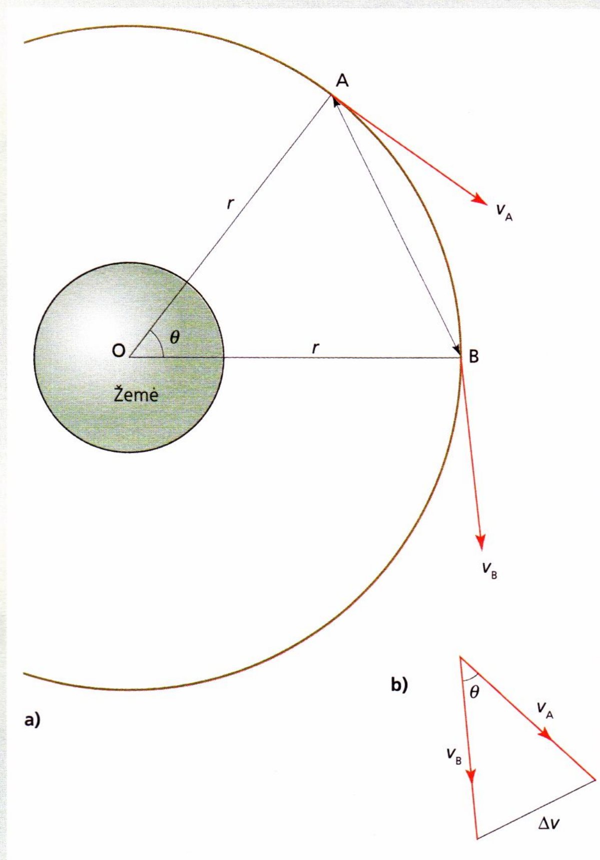
kur r – orbitos spindulys.



4.19 pav. **Į formulę $g = v^2/r$ įeinančių dydžių iliustracija**

Apskritimu judančio kūno įcentrinio pagreičio formulė

Formulė, kurią čia išvesime, tinka bet kokiam apskritimu judančiam kūnui, pavyzdžiui, ratlankiui, už virvutės laikomam kamuoliukui, kurį sukame ratu, automobiliui, darančiam posūkį ar orbita skriejančiam palydovui.



4.20 pav. **a) Apskritimu judantis palydovas. b) Vektorių trikampis, apibūdinantis palydovo judėjimą**

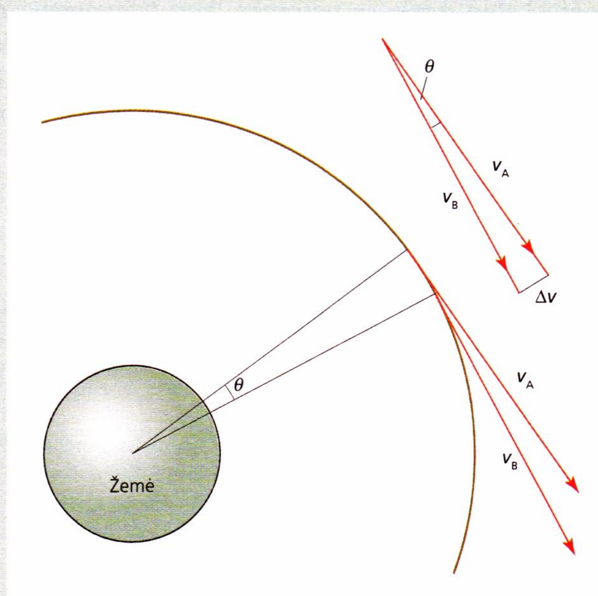
4.20a) paveiksle pažymėtos dvi pastoviu greičiu v aplink Žemę judančio palydovo padėtys A ir B. Kai spindulys r per laiką t pasisuka kampu θ (radianų), palydovas nuskrieja kelią $r\theta$. Gravitacijos jėga visą laiką veikia spindulio kryptimi link Žemės centro.

4.20b) paveiksle parodyta, kur po laiko tarpo t atsiduria vektorius, vaizduojantis palydovo *greitį*. Kadangi greičio absoliutinė vertė nekinta, vektorių v_A ir v_B ilgiai yra lygūs.

Δv vaizduoja greičio pokytį, kurį galima nustatyti iš vektorių trikampio:

$$v_B = v_A + \Delta v$$

Šiuose brėžiniuose pavaizduotas kūno padėtis skiria nemažas laikas t, taigi θ vertės yra didelės. Dabar pažvelkite į 4.21 pav., kur θ, taip pat ir Δv, yra labai maži. Kitaip tariant, nagrinėjamas



4.21 pav. **Vektorių trikampis, kai kampas tarp jų mažesnis nei 4.20 pav.**

mažas *laiko tarpsnis*, per kurį įvyko šis greičio pokytis.

Kūno pagreitis

$$a = \Delta v/t \qquad [1]$$

4.20a) pav. matome, kad greičiu v judėdamas kūnas per laiką t nueina kelią, lygų $r\theta$. Todėl:

$$v = r\theta/t \text{ , iš kur } 1/t = v/r\theta \qquad [2]$$

Šią $1/t$ išraišką įrašykime į (1) formulę:

$$a = v\Delta v/r\theta \qquad [3]$$

Greičio v kryptis visada sutampa su apskritimo liestinės kryptimi, taigi greitis yra statmenas apskritimo spinduliui. (Atkreipkite dėmesį, kad kai θ mažas, galioja $\sin\theta = \mathrm{tg}\theta = \theta$ (radianais.)

Spinduliui pasisukus kampu θ, tokiu pat kampu pasisuka ir v. Esant mažam kampui θ,

$$\Delta v = v\theta \text{ (žr. 4.21 pav.)} \qquad [4]$$

Įrašę Δv reikšmę į lygtį (3) gausime:

$$a = v^2/r \qquad [5]$$

Mažinant kampą θ, Δv darosi vis labiau statmenas greičiui v. Taigi jo kryptis sutampa su spindulio kryptimi link apskritimo centro. Tai, kaip žinome, yra kryptis, kuria veikia pagreitį sukelianti jėga.

Naudodamiesi sąryšiu

jėga = masė × pagreitis

galime užrašyti, kad jėga F, kurios reikia, kad priverstų m masės kūną judėti apskritimu, yra lygi

$$F = mv^2/r$$

Apskritimine orbita skriejančio palydovo greitis

Kaip matėme 4.17 pav., viršpoline orbita skriejantis palydovas pralekia virš kai kurių Žemės paviršiaus sričių. Kokios sritys patenka į palydovo apžvalgos lauką, priklauso nuo to, kiek kartų jis apskrieja Žemę per 24 valandas, t. y. nuo jo greičio. Greitis pasirenkamas dar iki palydovo starto, todėl vieno apsisukimo apie Žemę trukmė priklauso nuo palydovo paskirties: jei tai meteorologinis palydovas, jis turi skrieti arti Žemės, jei ryšių palydovas, tai jo orbitos spindulys turi būti didesnis.

Palydovo greitis priklauso tiek nuo orbitos spindulio, tiek ir nuo gravitacinio lauko stiprio tame aukštyje. Įprastinis žema orbita skriejantis palydovas yra nutolęs nuo Žemės 100 km. Tai atitinka 6,47 × 10^6 m orbitos spindulį. Jo įcentrinis pagreitis yra lygus g vertei tame aukštyje, t. y. 9,53 m · s^{-2}.

Taigi pagal (5) lygtį palydovo greitis $v = \sqrt{gr}$. (Čia v = 7,85 km · s^{-1}.)

Jo orbitos apskritimo ilgis $2\pi r$ yra lygus 4,07 × 10^4 km. Todėl palydovas apskrieja aplink Žemę per 86,3 minutes.

Dabar perskaitykite šį skirsnį dar kartą ir atlikite skaičiavimus patys.



4.22 pav. **Rengdama orų prognozę meteorologė nagrinėja vaizdą, gautą iš meteorologinio palydovo**

Geostacionarieji palydovai

Ryšių palydovai išvedami į **geostacionarias,** arba **geosinchronines,** orbitas, t. y. jie nejuda Žemės paviršiaus atžvilgiu. Dėl to antžemines antenas, siunčiančias ir priimančias duomenis iš palydovo, pakanka nukreipti viena kryptimi, ir nereikia jų sukti, kad galėtų sekti palydovą.

Kad išliktų geostacionarioje orbitoje, palydovo orbita turi būti tiksliai virš pusiaujo ir jis turi apskrieti savo orbitą tiksliai per tą patį laiką, per kurį Žemės paviršiaus taškas po palydovu apsisuka *savo* orbitoje, t. y. per 24 valandas. Teoriškai geostacionarusis palydovas „išlieka“ virš to paties taško Žemės paviršiuje. Iš tikrųjų jo padėtis truputį kinta, nes palydovo greitį veikia nedideli Žemės gravitacinio lauko pokyčiai. Jam atstatyti į reikiamą padėtį naudojami nedideli korekciniai raketiniai varikliai.

Naudodamiesi ankstesniame puslapyje pateikta (5) formule galime apskaičiuoti aukštį, kuriame turi skrieti palydovas, kad išliktų geostacionarioje orbitoje.

Tarkime, orbitos spindulys r_p. Palydovas turi judėti tokiu orbitiniu greičiu, kad

$2\pi r_p = vt = v \times 86\,400$ (t lygu 24 valandoms = 86 400 sekundžių)

Taigi $$v = 2\pi r_p/86\,400 \qquad [6]$$

Iš (5) lygties $$v = \sqrt{g r_p}\,. \qquad [7]$$

Atstumu r_p $$g = GM/r_p^{\,2}$$

Šią g vertę įrašę į (7) lygtį gausime

$$v = \sqrt{GM/r_p}$$

Sulyginus v išraiškas lygtyse (6) ir (7)

$$2\pi r_p/86\,400 = \sqrt{GM/r_p}$$

Įrašę konstantų G ir M vertes gausime, kad geostacionarios orbitos spindulys r_p yra lygus 4,23 × 10^7 m. Tai daugiau nei šešis kartus viršija Žemės spindulį, o g vertė tokiame nuotolyje lygi 0,223 N · kg^{-1}.



K Palydovas skrieja apskritimine viršpoline orbita 400 km aukštyje virš Žemės paviršiaus.

Apskaičiuokite: **a)** jo orbitinį greitį, **b)** laiką, per kurį jis apskrieja savo orbitą, ir **c)** kiek kartų jis apskrieja Žemę per 24 valandas. (Imkite g vertę 8,7 m · s^{-2}, Žemės spindulį r = 6,4 × 10^6 m.)

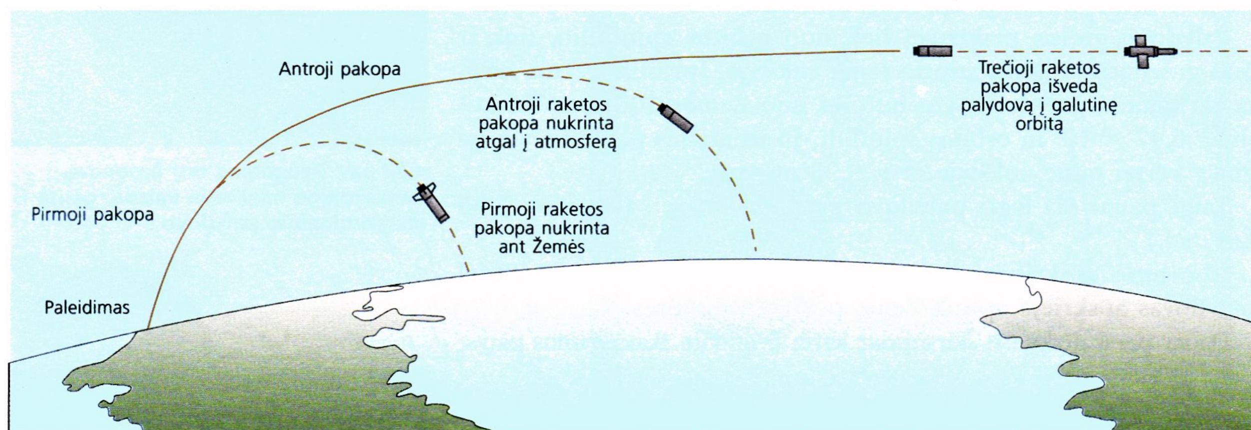
L a) Perskaičiuokite geostacionariojo palydovo judėjimą nusakančius dydžius. *GM* vertę laikykite lygia 4,0 × 10^{14} N · m^2.

b) Naudodamiesi 67 puslapio pavyzdyje pateiktais Mėnulio parametrais raskite stacionarios orbitos aplink Mėnulį spindulį.

Palydovo išvedimas į orbitą

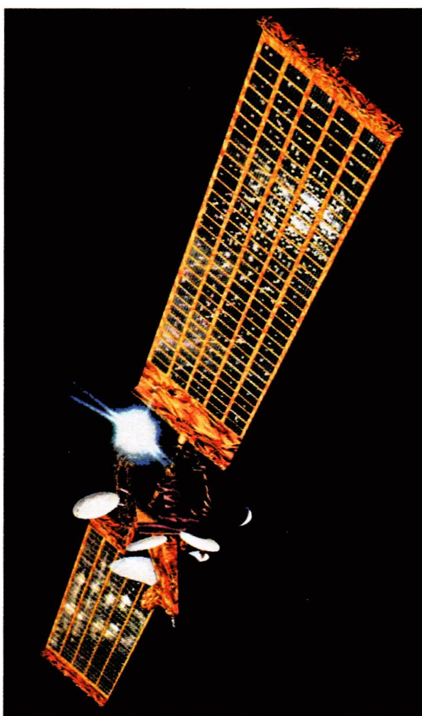
4.23a) pav. pavaizduota, kaip *Ariane* raketa pakelia palydovą į orbitą. Kuras sudaro didžiąją dalį daugiapakopės raketos nešėjos masės, ir daug šio kuro suvartojama tam, kad paskutinė pakopa imtų skrieti žema orbita (apie 100 km virš Žemės paviršiaus) aplink Žemę. Likęs kuras suvartojamas palyginti nedideliam naudingam kroviniui – vienam ar keletui palydovų išvesti į jų galutines orbitas.

4.23a) pav. **Palydovas išvedamas į geostacionarią orbitą daugiapakope raketa nešėja. (Ta pačia raketa galima paleisti į orbitą ir daugiau nei vieną palydovą)**



4.23b) pav. **Raketa *Ariane*. Ji turi du arba keturis startinius raketinius variklius. Jų skaičius parenkamas pagal tai, kokios masės palydovus raketa turi išvesti į orbitą**



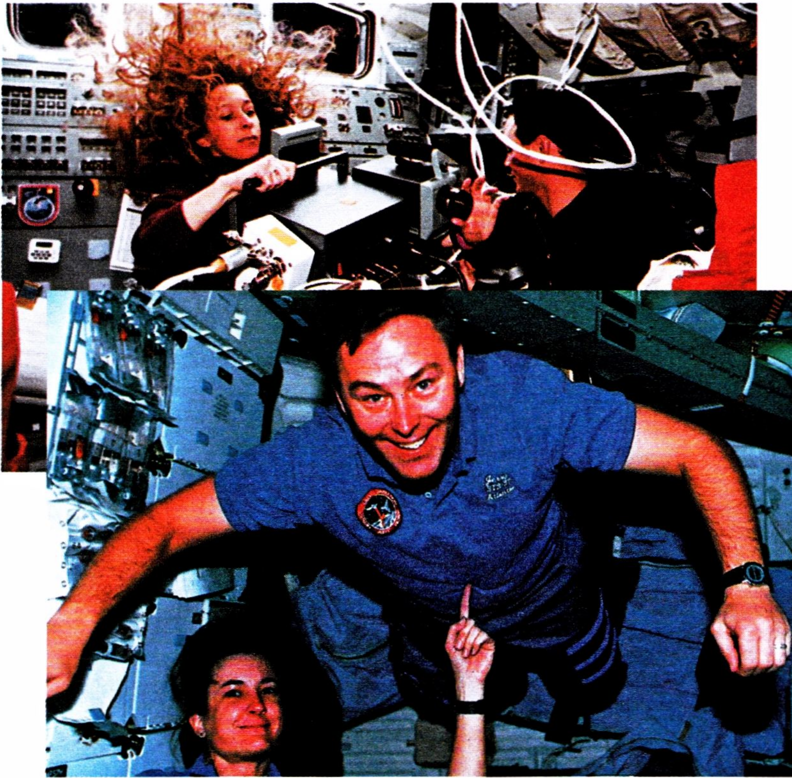


4.24 pav. **Ryšių palydovas *Olympus*, naudojamas televizijos ir radijo transliacijoms**

Nesvarumas

Svoris* – tai paprasčiausiai jėga, kuri veikia kūną dėl gravitacijos. Mes jaučiame „svorį“, kai ką nors keliame. Savo kūno svorį suvokiame dėl jutimų savo raumenyse. Kartais „jaučiamės besvoriai“: amerikietiškuose kalneliuose arba lėktuve, kai dėl oro sūkurių jis

* Lietuviškoje literatūroje svoriu paprastai vadinama jėga, kuria sunkio jėgos veikiamas kūnas veikia atramą arba pakabą, o sunkio jėga vadinama jėga, kuria Žemė traukia artimus kūnus. Šioje knygoje sunkio jėgos sąvoka nevartojama – čia yra tik gravitacijos jėgos sąvoka, aprašanti bet kokių dviejų kūnų sąveiką. – *Vert. past.*



?

M Astronautė yra kosminėje laboratorijoje, skriejančioje apie Žemę. Jai reikia iš vienos laboratorijos pusės į kitą pernešti metalinę dėžę, ant kurios užrašyta „50 kg".

a) Pasiūlykite, kaip jai patikrinti, ar dėžė tuščia, ar ne.

b) Tarkime, kad dėžės kartu su jos turiniu masė yra 50 kg; aprašykite, kaip galėtumėte efektyviai ir saugiai pergabenti tą dėžę per laboratoriją.

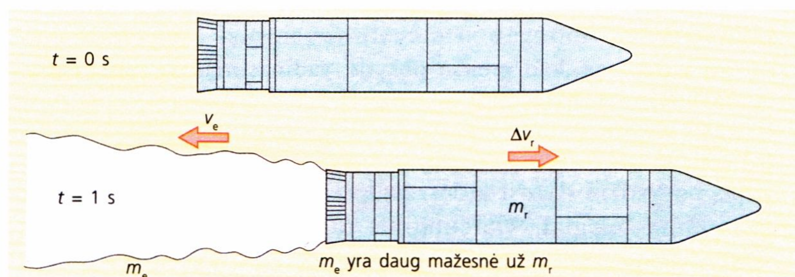
4.25 pav. **Astronautai Žemės orbitoje jaučiasi nesvarūs, nes, kaip ir jų kosminis laivas, jie yra laisvojo kritimo būsenoje. Iš ko galime spręsti apie „nesvarumą" viršutinėje nuotraukoje?**

staiga „smukteli" žemyn – tuo metu mes būname laisvojo kritimo būsenoje, ir kūnui nereikalinga raumenų atrama. Tačiau ir tada mus *veikia* gravitacinė Žemės traukos jėga.

Astronautai apie Žemę besisukančiame kosminiame laive irgi patiria nesvarumą. Jie, kaip ir 69 psl. aprašytas patrankos sviedinys, yra laisvojo kritimo link Žemės centro būsenoje. Kai kurie žmonės mano, kad nesvarumo pojūtis atsiranda, kai neveikia gravitacijos jėga. Iš tikrųjų tokia nuomonė klaidinga. Jei astronautų neveiktų gravitacijos jėga, jie su visu savo erdvėlaiviu nuskrietų, paklusdami Niutono judėjimo dėsniams, tiesia trajektorija.

9 JUDESIO KIEKIS – RAKETOS IR SMŪGIAI

Vykstant bet kokiai sąveikai ir veikiant bet kokioms jėgoms *judesio kiekis nepakinta* (apie judesio kiekį žr. 3 skyrių, 33–34 psl.). Šis dėsnis akivaizdžiai pasireiškia skriejant raketai. Jos greitėjimą sukelia didžiuliu greičiu išsiveržianti medžiaga. 4.26 pav. atvaizduota, kaip tai atsitinka. Bendras visos raketos su kuru sistemos judesio kiekis skriejant raketai išlieka pastovus; faktiškai jis lygus nuliui.



4.26 pav. **Raketa prieš startą ir praėjus 1 sekundei nuo to momento, kai įsiliepsnojo kuras**

Iš pradžių raketa yra rimties būsenoje. Tarkim, per 1 sekundę iš raketos greičiu v_e išsiveržia karštos dujos, kurių masė m_e. Per tą sekundę išmestos medžiagos judesio kiekis $m_e v_e$ (4.26 pav. jis nukreiptas kairėn). Raketa įgyja tokį pat judesio kiekį ir juda dešinėn greičiu Δv_r. Sistema yra izoliuota, t. y. jos neveikia jokios kitos jėgos, ir ji nesąveikauja su kitais kūnais, todėl bendras judesio kiekis nekinta. Galime užrašyti:

$$m_e v_e + m_r \Delta v_r = 0,$$

iš kur raketos greičio prieaugis $\Delta v_r = -(m_e / m_r) v_e$

PAVYZDYS

K Raketoje uždegamas kuras, ir iš jos greičiu v_e, lygiu $5{,}0 \times 10^3$ m · s^{-1} raketos atžvilgiu, per sekundę išsiveržia 5,0 kg dujų. Raketos masė lygi 4 tonoms.

a) Koks raketos greitis v_r, praėjus vienai sekundei?

b) Ar erdvėlaivis su raketiniu varikliu judės su pastoviu pagreičiu?

A

a) Per 1 sekundę raketos masė sumažėja 5 kilogramais, tačiau šio masės pokyčio (maždaug 0,1%) per pirmąją sekundę nepaisysime.

Greitis yra vektorius; čia išmestų dujų greitį laikysime *neigiamu*:

$$\text{bendras judesio kiekis} = \frac{\text{raketos}}{\text{judesio kiekis}} + \frac{\text{išsiveržusių dujų}}{\text{judesio kiekis}} = 0$$

$$(4 \times 10^3 \times v_r) - (5 \times 5 \times 10^3) = 0$$

Taigi po 1 sekundės $\quad v_r = 6{,}3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

b) Ne. Raketa varomo erdvėlaivio pagreitis nebus pastovus. Dujų išmetimo iš raketos sparta yra pastovi, todėl raketos judesio kiekio prieaugis per vieną sekundę yra visą laiką pastovus. Kadangi raketos masė mažėja, tai *greičio* prieaugis per sekundę turi didėti, kad judesio kiekio prieaugis išliktų pastovus.

Tarkim, kad per trumpą laiko tarpsnį Δt iš raketos greičiu v_e jos atžvilgiu išsiveržia dujų masė Δm_e. Tuo metu raketos masė yra lygi m_r. Raketos greitis padidės dydžiu Δv_r. Žinome, kad pagal judesio kiekio dėsnį per trumpą laiko tarpsnį Δt

$$\frac{\text{raketos judesio}}{\text{kiekio pokytis}} = \frac{\text{išsiveržusių dujų}}{\text{judesio kiekiui}}$$

$$\frac{(\text{raketos}}{\text{masė } m_r)} \times \frac{(\text{greičio}}{\text{pokytis } \Delta v_r)} = \frac{(\text{išsiveržusio}}{\text{kuro masė } \Delta m_e)} \times \frac{(\text{išsiveržusio}}{\text{kuro greitis } -v_e)}$$

$$m_r \Delta v_r = -\Delta m_e v_e$$

Taigi raketos greičio *pokytis* per trumpą laiko tarpsnį Δt lygus:

$$\Delta v_r = -\Delta m_e v_e / m_r$$

Ši lygtis patvirtina, kad greičio pokytis, vadinasi, ir pagreitis, laikui bėgant didės, nes mažės m_r.

■ Dabar tinkamas metas imtis dinaminės duomenų lentelės, pateiktos 79 psl., užduotyje apie raketos judėjimą. Tai būtų skaitmeninis, ne algebrinis raketos judėjimo tyrimo metodas.

Iš šio pavyzdžio darosi aišku, kad raketos masė, taip pat ir pagreitis, kinta tolygiai. Matematinis raketos judėjimo aprašymas plačiau nagrinėjamas sekančiame puslapyje.

Raketos judėjimas

Nagrinėdami raketos judėjimą bet kurioje situacijoje turime aprašyti visą sistemą, t. y. pačią raketą ir išsiveržusius degimo produktus. Bet kuriuo metu raketa skrieja, kaip parodyta 4.27 pav., greičiu v_r, kuris yra matuojamas nejudamos atskaitos sistemos atžvilgiu.

Tarkim, iš raketos po kurio laiko greičiu v_e išsiverš dujų masė m_e. Taip supaprastiname skaičiavimus, nes galime laikyti, kad raketos masė iki išsiveržiant dujoms yra lygi $m_r + m_e$. Išsiveržus dujoms raketos greitis išauga dydžiu Δv_r. (Kaip įprasta, simbolį Δ naudojame mažam nagrinėjamo dydžio pokyčiui pažymėti.)

Raketos atžvilgiu kuras (jo masė m_e) yra išmetamas greičiu $-v_e$. Raketa pradeda judėti, ir stebėtojas mato dujas, nejudamos atskaitos sistemos atžvilgiu išsiveržiančias greičiu $v_r - v_e$. Atkreipkite dėmesį, kad v_e dažniausiai esti gerokai didesnis už v_r.

Tvermės dėsnis reiškia, kad bet kuriais dviem laiko momentais galioja lygybė:

bendras judesio kiekis pirmuoju laiko momentu = bendram judesio kiekiui antruoju laiko momentu

Todėl:

judesio kiekis (raketos + kuro) = raketos judesio kiekiui + išsiveržusio kuro judesio kiekiui

$$(m_r + m_e)v_r = m_r(v_r + \Delta v_r) + m_e(v_r - v_e)$$

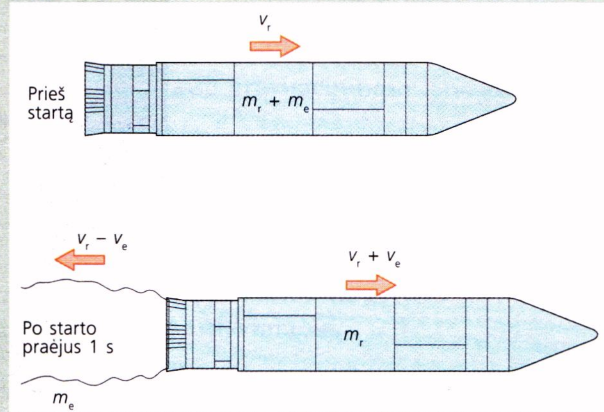
Šią išraišką galima supaprastinti:

$$m_r\Delta v_r - m_e v_e = 0$$

$$\Delta v_r = v_e\left(\frac{m_e}{m_r}\right)$$

Tačiau m_e yra lygi *raketos masės sumažėjimui*, taigi ją galima pakeisti dydžiu $-\Delta m_r$ (atkreipiant dėmesį į ženklą). Taip gauname bendresnį rezultatą:

$$\Delta v_r = -v_e\left(\frac{\Delta m_r}{m_r}\right) \quad (1)$$



4.27 pav. **Raketa prieš startą ir praėjus 1 sekundei po to, kai buvo uždegtas kuras**

Tai ta pati formulė, kurią paprastesniu būdu gavome 74 psl. pateiktame pavyzdyje.

Kitimas laike

Dabar panagrinėkime ilgesnį laiko tarpsnį, kurio metu raketos masė pakinta nuo pradinės vertės m_{pr} iki galinės vertės m_g, o tuo pat metu jos greitis pakinta nuo v_{pr} iki v_g. (1) lygtį integruojame šiose ribose:

$$\int_{v_{pr}}^{v_g} dv = v_e \int_{m_{pr}}^{m_g} \frac{dm_r}{m_r}$$

Suintegravę gauname:

$$v_g - v_{pr} = v_e \ln\frac{m_{pr}}{m_g}$$

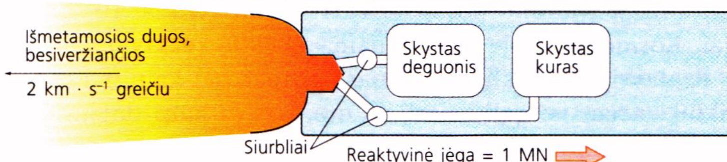
Čia ln žymi natūrinį logaritmą (jo pagrindas e).

Taigi, jei žinoma bet kokiu greičiu skriejančios raketos pradinė masė, tai galime apskaičiuoti naują greitį, kuriuo raketa skries, kai jos masė pakis iki kitos vertės.

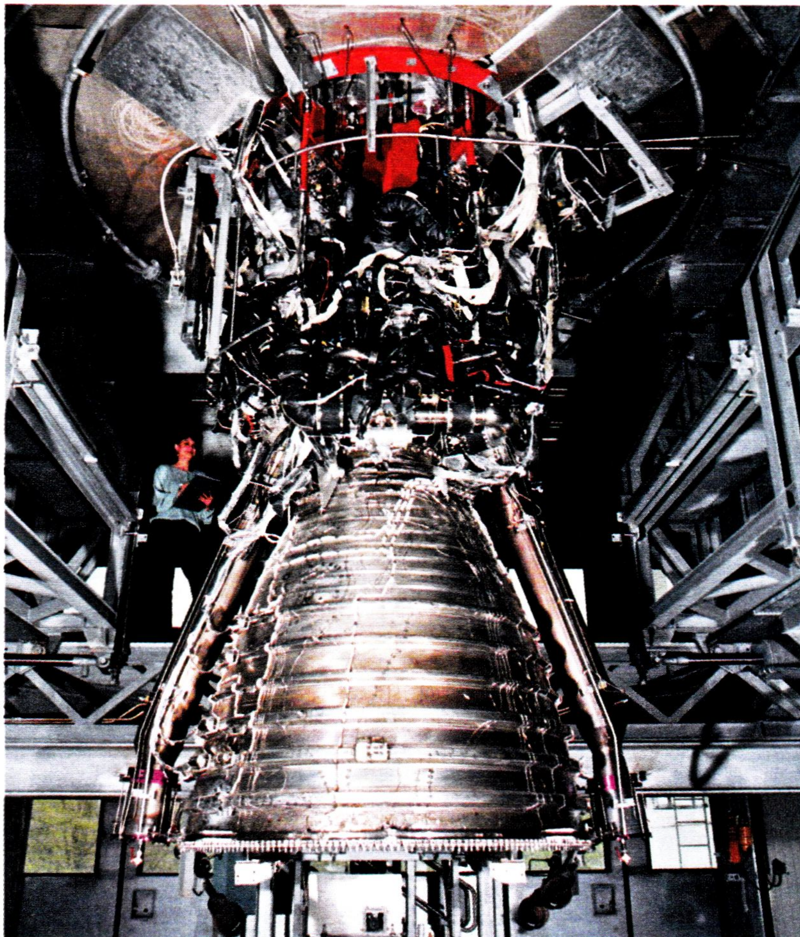
Raketos ir reaktyviniai varikliai

Raketiniai varikliai yra sukonstruoti taip, kad veiktų beorėje erdvėje. Jų energijos šaltinis yra degalų ir deguonies mišinys, dažniausiai skysto būvio.

■ Žr. 10, 11 ir 12 klausimus.



4.28 pav. **Supaprastinta raketinio variklio schema**



4.29 pav. **Raketos *Ariane* variklis**

Raketa nešėja *Saturn,* naudota *Apollo* skrydžiuose į Mėnulį (1969–1972), buvo didesnė nei Big Beno bokštas. Ji turėjo penkis milžiniškus variklius, pačius didžiausius iš pagamintų iki tol, o antroji šios raketos pakopa turėjo penkis mažesnius variklius. Pirmosios pakopos varikliai buvo po 5 metrus ilgio, svėrė po 8,4 tonas ir išvystydavo 6,7 meganiutonų reaktyvinę jėgą. Atitarnavus pirmajai pakopai, ir išeikvojus visą jos kurą, įsijungia penki antrosios pakopos varikliai. Degant žibalo ir skysto deguonies mišiniui išmetamosios dujos veržiasi iš raketos 2500 metrų per sekundę greičiu ir sukelia 1,14 meganiutonų reaktyvinę jėgą.

Meganiutonas [MN] yra lygus 10^6 niutonų.

Trečioji pakopa į Mėnulį skriejantį erdvėlaivį išveda į Žemės orbitą. Erdvėlaivis talpina trijų astronautų komandą, jų buitinio aprūpinimo sistemas, nusileidimo Mėnulyje modulį *Lunar Lander* ir raketas bei degalus šio aparato nuskraidinimui į Mėnulį bei atgal.

Reaktyvinė jėga

Raketos variklyje degant vandenilio ir deguonies mišiniui karštos dujos išmetamos 500 kg · s^{-1} sparta ir išlekia 3500 m · s^{-1} greičiu. Tai atitinka 500 × 3500 kg · m · s^{-1} judesio kiekio pokytį *per sekundę,* t. y. $1{,}75 \times 10^6$ kg · m · s^{-2} *judesio kiekio kitimo spartą.* Pagal antrąjį Niutono dėsnį tai ekvivalentu $1{,}75 \times 10^6$ niutonų jėgai. Kosmonautikoje tai vadinama variklio **reaktyvine jėga.**

Žr. 13 klausimą.

Reaktyvinių variklių principas yra toks pat kaip ir raketinių variklių, tačiau jie gali veikti tik ore, nes jų kuro degimui vartojamas ore esantis deguonis.

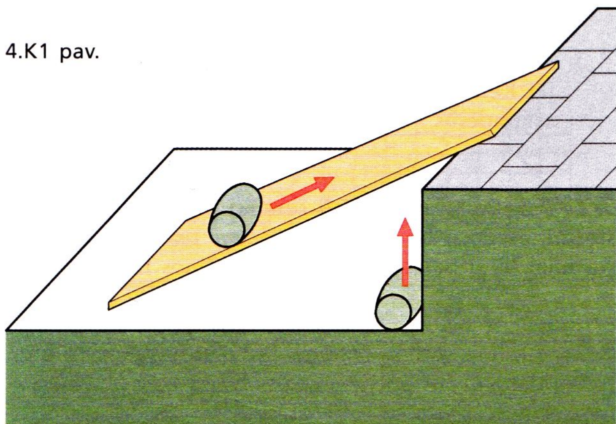
SANTRAUKA

Išstudijavę šį skyrių jūs turėtumėte mokėti šitokius klausimus.

- Remiantis darbo sąvoka $W = Fd$ paaiškinti energijos pokyčius ir panaudoti darbo apibrėžimą užduotims, susijusioms su gravitacine sąveika, atlikti ir spręsti uždavinius naudojantis jėgos $F = mg$ ir kelio sąvokomis.
- Išvesti formules, aprašančias gravitacinės potencinės energijos pokytį $\Delta E = mg\Delta h$ ir kinetinę energiją $\frac{1}{2}mv^2$, bei naudoti šias sąvokas ir formules skaičiuojant ir aiškinant kūnų judėjimą vienalyčiame gravitaciniame lauke.
- Vartoti sąvokas ir formules, aprašančias gravitacinės potencinės energijos pokytį $GMm(1/r_1 - 1/r_2)$ ir kinetinę energiją, kai reikia atlikti skaičiavimus ir paaiškinti kūnų judėjimą radialiuose gravitaciniuose laukuose.
- Įsigilinti į energijos tvermės dėsnį, kai jis taikomas gravitacijos uždaviniams spręsti.
- Braižyti ir paaiškinti jėgos priklausomybės nuo atstumo grafikus tiek vienalyčiuose, tiek ir radialiuose gravitaciniuose laukuose.
- Vartoti gravitacinio potencialo sąvoką ir jo formulę $-GM/r$, įžvelgti skirtumą tarp gravitacinio potencialo ir gravitacinės potencinės energijos.
- Išvesti antrojo kosminio greičio formulę ir ją naudoti skaičiavimuose.
- Paaiškinti, kaip gravitacijos jėga susijusi su palydovo judėjimu apskritimine orbita, ir naudoti formulę $g = v^2/r$.
- Paaiškinti šitokius terminus: viršpolinė orbita, geostacionari orbita, nesvarumo būsena, laisvasis kritimas.
- Vartoti judesio kiekio sąvoką aiškinant raketos ir reaktyvinio variklio veikimo principus ir mokėti apskaičiuoti raketos greičio bei reaktyvinės jėgos pokyčius.

KLAUSIMAI

1 Statinę iš rūsio galima iškelti dviem būdais (4.K1 pav.): **a)** užridenti ją nuožulnia plokštuma (rampa), **b)** tiesiog iškelti, pririšus virvę. Parašykite (maždaug pastraipą teksto), kurį metodą taikant tektų atlikti didesnį darbą. (Jums reikia pasinaudoti darbo apibrėžimu, atsižvelgti į gravitacijos ir trinties jėgas bei nueitą kelią.)



4.K1 pav.

2 Šis klausimas – apie darbą ir energijos tvermę. Įsivaizduokite, kad 25 kg masės vežimėlį savitarnos parduotuvėje stumiate horizontaliai tiesia linija 50 metrų, veikdami jį 20 N jėga.

a) Kokį darbą jūs atliekate?

b) Jei sistemos atžvilgiu atliekamas darbas, ji įgauna energijos. Kokioms sistemoms (kūnams) atitenka energija stumiant vežimėlį?

c) Nepaisydami energijos nuostolių dėl trinties įvertinkite vežimėlio greitį 50 m atkarpos pabaigoje.

d) Kodėl automobilių stovėjimo aikštelės prie parduotuvių turi būti kiek įmanoma vienodo lygio?

3

a) Jūs atliekate sunkų darbą pjaudami rankiniu pjūklu malkas židiniui. Kam teko energija, išsiskyrusi atliekant šį darbą? Pagrįskite savo atsakymą.

b) Kokių duomenų jums reikėtų, kad galėtumėte įvertinti, ar energija, kurią jūs atidavėte pjaudami pliauską, yra didesnė už energiją, kuri išsiskirtų tai pliauskai sudegus?

4 Iš 5 m aukščio paleistas teniso kamuoliukas atšoka į 3,2 m aukštį.

a) Kokiu greičiu jis atsitrenkia į žemę?

b) Kiek energijos jis praranda smūgio metu?

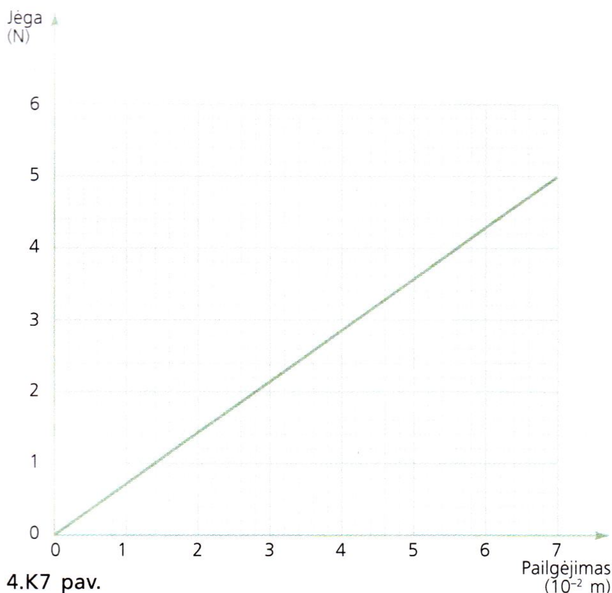
5 Ar gali įgyti neigiamas vertes:

a) kūno gravitacinė potencinė energija,

b) jo kinetinė energija?

6 125 km · h^{-1} greičiu važiuojančiame traukinyje sėdintis studentas skaito fizikos vadovėlį, kurio masė lygi 2,5 kg. Kokia yra šios knygos kinetinė energija: **a)** studento ir **b)** keleivio, sėdinčio kitame traukinyje, kuris 125 km · h^{-1} greičiu važiuoja priešinga kryptimi, atžvilgiu?

7 Jėga, kurios reikia guminei juostai ištempti, kinta taip, kaip parodyta paveiksle. Įvertinkite, kiek energijos yra sukaupta guminėje juostoje, kai ji ištempta tiek, kiek parodyta grafike.



4.K7 pav.

8 Pasinaudokite lentelėje pateiktais duomenimis apie Marsą bei jo gravitacinį lauką ir atsakykite į šiuos klausimus.

Marso masė = 6,40 × 10^{23} kg
Spindulys = 3,39 × 10^6 m
Sukimosi periodas = 8,862 × 10^4 s

a) Lentelėje pateiktus duomenis, rodančius, kaip Marso gravitacinis laukas priklauso nuo atstumo, pavaizduokite grafiškai.

4.K8 lentelė. ***g* = gravitacinio lauko stipris (N · kg^{-1}), *R* = atstumas nuo Marso centro (10^6 metrų)**

g	3.82	2,74	1,76	1,22	0,90	0,69	0,54	0,43	0,20	0,10
R	3,39	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	15,00	20,00

b) Remdamiesi savo grafiku, įvertinkite masės vienetui tenkantį potencinės energijos pokytį, leidžiantis kosminiam aparatui *Mars Lander* iš 20 × 10^6 m aukščio iki Marso paviršiaus.
(i) Remdamiesi savo atsakymu įvertinkite gravitacinį potencialą Marso paviršiuje.
(ii) Pasitikrinkite atsakymą naudodamiesi gravitacinio potencialo formule
$$V = -GM/r$$

c) apskaičiuokite antrąjį kosminį greitį Marse.
(i) Koks turi būti ryšių palydovo sukimosi aplink Marsą periodas, kad jis, skriedamas „areostacionaria" orbita, visą laiką liktų virš nusileidimo aikštelės Marso paviršiuje? (*Ares* – graikiškai Marsas.)
(ii) Koks turėtų būti palydovo orbitos spindulys?

9 Neutroninės žvaigždės masė yra 10^{30} kg, o spindulys 10^4 m.

a) Tarę, kad Niutono dėsniai ten vis dar galioja, o *G* lygi 6,7 × 10^{-11} N · m^{-2} · kg^{-2}, įrodykite, kad antrasis kosminis greitis šioje žvaigždėje yra apytiksliai lygus 1,2 × 10^8 m · s^{-1}.

b) Juodoji skylė – tai kūnas, kurio aplinkoje antrasis kosminis greitis yra bent jau ne mažesnis nei šviesos greitis, 3 × 10^8 m · s^{-1}. Iki kokio dydžio turėtų sumažėti ši neutroninė žvaigždė, kad taptų juodąja skyle?

10 Erdvėje, kur galima nepaisyti gravitacinių laukų, erdvėlaivis juda su pagreičiu, kurį suteikia raketinis variklis, užtikrinantis pastovią reaktyvinę jėgą. Nubraižykite grafiką, vaizduojantį erdvėlaivio greičio priklausomybę nuo laiko. Paaiškinkite šį grafiką.

11 400 tonų masės erdvėlaivis yra varomas raketų, išmetančių kurą 5000 m · s^{-1} greičiu raketos atžvilgiu.

a) Kiek padidės erdvėlaivio greitis per laiko tarpsnį, kai bus suvartota **(i)** 100 tonų degalų, **(ii)** 300 tonų degalų?

b) Aprašytasis 400 tonų masės erdvėlaivis 12,0 × 10^3 m · s^{-1} greičiu išskrieja už Saulės sistemos ribų link Kentauro Alfos žvaigždės. Po to jis suvartoja 300 tonų degalų ir jo greitis dar padidėja. Kiek laiko truks kelionė iki Kentauro Alfos sistemos? (Atstumas nuo Saulės sistemos iki Kentauro Alfos lygus 1,37 × 10^8 šviesos sekundėms.)

12 Raketinis variklis gali suteikti pagreitį kosminei stočiai, esančiai beorėje erdvėje, kur reaktyviniai varikliai būtų bejėgiai. Paaiškinkite šiuos faktus.

13 Raketinis variklis 3000 m · s^{-1} greičiu išmeta 200 kg karštų dujų. Dujų išmetimo sparta lygi 5 kg · s^{-1}. Kokią traukos jėgą išvysto šis variklis?

Užduotis

JUDĖJIMAS GRAVITACINIAME LAUKE

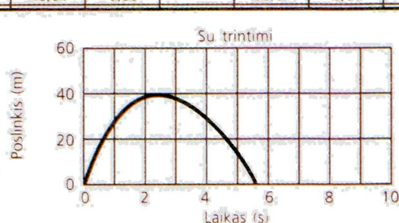
Judėjimas vienalyčiame gravitaciniame lauke

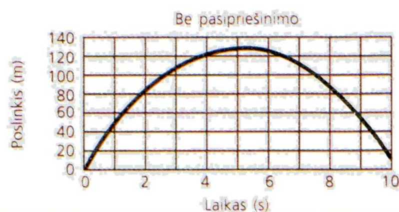
Ši užduotis modeliuoja judėjimą kūno, mesto vertikaliai aukštyn vienalyčiame gravitaciniame lauke; toks laukas egzistuoja arti Žemės paviršiaus.

Kaip minėta 2 skyriaus užduotyje, naudojimosi dinaminėmis duomenų lentelėmis detalės įvairiose kompiuterinėse programose šiek tiek skiriasi. Jei turėsite sunkumų su žemiau pateiktomis komandomis, klauskite patarimo tų, kurie yra įgudę dirbti su tokia programa.

1 Pirmiausia pasiruoškite duomenų lentelę arba paimkite tą, kurią naudojote 2 skyriaus užduotyje 28 psl. Šioje užduotyje vartojami simboliai yra parodyti 4.U1 pav. Atkreipkite dėmesį: D ≡ Δ. Tarkime, kad pradinis greitis V1 yra lygus 50 m · s^{-1}, o laisvojo kritimo pagreičio vertė yra –9,8 m · s^{-2}.

A	A	B	C	D	E	F	G
1	Judėjimas vienalyčiame gravitaciniame lauke						
2							
3							
4	Pradinis greitis V1 =			50,00	m/s		
5	Pagreitis *g* =			–9,80	m/s^2		
6	Laiko tarpsnis D*t* =			0,20	s		
7	Pasipriešinimo koeficientas k =			0,02			
8							
9		Judėjimas be trinties			Judėjimas su trintimi		
10	Laikas	Greitis	Poslinkis		Greitis	Poslinkis	
11	0,00	50,00	0,00		50,00	0,00	
12	0,20	48,04	9,80		38,04	8,80	





38	5,40	–2,92	127,12		–19,56	4,46	
39	5,60	–4,88	126,34		19,99	0,50	
40	5,80	–6,84	125,16		–20,35	–3,53	

4.U1 pav.

a) Nubrėžkite nueito kelio priklausomybės nuo laiko grafiką.

b) Tada nustatykite: **(i)** per kiek laiko kūnas nukris atgal ant žemės, **(ii)** į kokį maksimalų aukštį jis pakils

c) Patyrinėkite, kas vyksta pakeitus pradinį greitį.

Oro pasipriešinimo įtaka

2 Ore judantis kūnas patiria pasipriešinimą. Oro pasipriešinimas priklauso nuo kūno formos, tačiau paprastai jis aprašomas pasipriešinimo jėga, kurios dydis bet kuriuo momentu yra proporcingas kūno greičio kvadratui. Modeliuodami oro pasipriešinimo veikimą turime prisiminti, kad pasipriešinimo jėga visada veikia priešinga judėjimui kryptimi, todėl šios jėgos ženklas pakinta, kai į viršų judėjęs kūnas pradeda kristi.

a) Dinaminę duomenų lentelę (4.U1 pav.) papildykite eilute, pažymėta „Pasipriešinimo koeficientas **k** = ". Į atitinkamą langelį įrašykite k vertę 0,02. Užrašykite vardus dar dviem stulpeliams „Greitis" ir „Poslinkis" ir, jei norite, sukomponuokite juos taip, kaip parodyta 4.U1 pav.

Algoritmas poslinkio skaičiavimui yra identiškas algoritmui judėjimo be trinties atveju.

b) Jei atsižvelgtume į pasipriešinimo poveikį greičiui, turėtume atsižvelgti į neigiamą pagreitį, kuris visą laiką veikia priešinga greičiui kryptimi, t. y. reikia jį pridėti prie neigiamo gravitacinio pagreičio kūnui judant aukštyn, ir atimti iš šio pagreičio, kai kūnas krinta. Tačiau kadangi pasipriešinimo jėga yra proporcinga greičio kvadratui, o neigiamo skaičiaus kvadratas visada yra teigiamas, negalime tikėtis, kad pakeitus greičio kryptį skaičiavimuose tai atitiks pasipriešinimo jėgos krypties pokytį. Šį pokytį, užrašę pasipriešinimo pagreitį, galime įtraukti į skaičiavimus tokiu būdu:

k × tikroji greičio vertė (įskaitant ženklą)
× absoliutinė greičio vertė

Absoliutinė greičio vertė visada turi teigiamą ženklą, o ji nustatoma panaudojus programoje „formulės" funkciją @ABS( ). Taigi stulpeliui „Greitis" algoritmas, atsižvelgiant į oro pasipriešinimą, būtų toks:

=E11+$D$6*($D$5+$D$7*(–E11)*@ABS(E11))

Įterpkite šią formulę į langelį E12, taip pat neužmirškite įrašyti pradinio greičio vertę ($D$4) langelyje E11.

c) Kaip parodyta 4.U1 pav., nukopijuokite kiekvieno stulpelio formules žemyn, ir poslinkio priklausomybes nuo laiko, kai paisoma oro pasipriešinimo, pavaizduokite grafiškai. Tipiškas grafikas pateiktas 4.U1 pav.

d) Taip pat nubraižykite ir greičio priklausomybes nuo laiko.

e) Pagalvokite apie šiuos klausimus:
Ar turi prasmę neigiami poslinkiai?
Kokios pasipriešinimo konstantos k reikšmės atitinka (jei iš viso atitinka!) tikroviškus rezultatus: **(i)** teniso, **(ii)** stalo teniso ir **(iii)** badmintono kamuoliukams?

f) Kaip šį modeliavimą galėtumėte panaudoti, jei koeficientą k reikėtų nustatyti bet kokiam kūnui?

Raketos judėjimas

Raketos judėjimo matematinis aprašymas yra gana sudėtingas. Jam tenka pasitelkti integralinį skaičiavimą: vis dėlto daugelį realių situacijų aprašančias lygtis labai sunku išspręsti netgi taikant integralinį skaičiavimą.

Tuo tarpu sudarius dinamines duomenų lenteles galima išspręsti gana sudėtingus analitinius uždavinius, beje, reikiamu tikslumu. Tokie skaičiavimai pagrįsti paprastais matematikos veiksmais ir to uždavinio formulavimui panaudota fizika.

3 Nagrinėjant raketos judėjimą reikia nustatyti, kas vyksta kai greitinamasis kūnas netenka masės. Pagrindiniai algoritmai, kuriuos reikia naudoti (parodyti 4.U2 pav.), pateikiami žemiau (D reiškia dydžio pokytį).

Masės sumažėjimas per laiko tarpsnį Dt: DM = masės kitimo sparta (masės pokytis per sekundę) x Dt

Raketos masė M = M – DM

Pagal judesio kiekio tvermės dėsnį M × DV = DM × Ve

Iš čia DV = DM/M × Ve

Greitis V = V + DV

a) Pradėkite nuo konstantų apibrėžimo, kaip parodyta 4.U2, ir užrašykite išmetimo greičio Ve (išmetamųjų dujų čiurkšlės greičio), skaičiavimuose pasirinkto laiko prieaugio Dt, raketos pradinio greičio bei pradinės masės ir dujų išmetimo spartos (masės pokyčio per sekundę) vertes. Modeliuojant tikrovišką situaciją, visa raketos veikimo trukmė turėtų būti apie 600 s.

b) Grafiškai pavaizduokite raketos greičio ir masės priklausomybes nuo laiko.

c) Patyrinėkite, kaip pasireiškia masės kitimo spartos, raketos pradinės masės ir išmetamųjų dujų greičio padidėjimas.

Gravitacinė potencinė energija

Šia užduotimi iliustruojama, kaip gravitacinis potencialas kinta tolstant nuo masyvios sferos, pavyzdžiui, Žemės, centro. Pasinaudosime gravitacijai aprašyti taikomu Niutono atvirkštinio kvadrato dėsniu. Energiją, kuri pereina į kūno, pajudėjusio atstumu D*r* išilgai jėgos linijos gravitaciniame lauke, potencinę energiją, galime apskaičiuoti pagal atliktą darbą:

jėga × kelias.

Masės vienetą veikianti jėga yra lygi *g* N. *g* pradinė vertė yra lygi 9,827 N · kg^{-1}.

4

a) *g* priklausomybei nuo atstumo modeliuoti pasinaudokite dinamine duomenų lentele.

Įrašykite D*r* = 500 000 m

Imkite GM vertę = 4 × 10^{14} J · m · kg^{-1}

Pradinė vertė *r* = Žemės spinduliui = 6,38 × 10^6 m

Sukurkite naują stulpelį, į kurį įrašysite *g* vertes, pradėję nuo atstumo *r* = 6,38 × 10^6 m ir baigę 5*r* (3,19 × 10^7 m), o *r* keiskite žingsniu D*r* = 5 × 10^5 m, ir taikykite atvirkštinio kvadrato dėsnį

$$g = GM/r^2$$

Sukurkite kitą stulpelį ir apskaičiuokite kiekviename žingsnyje perduotą energiją:

DU = D*r* × (vidutinė *g* vertė šiame intervale)

Palaipsniui sumuodami naujai apskaičiuotas vertes DU, kitame stulpelyje apskaičiuokite augančias gravitacinio potencialo U (masės vienetui tenkančios potencinės energijos) vertes.

b) Grafiškai pavaizduokite U kitimą didėjant atstumui, t. y. pateikite U priklausomybę nuo *r*.

c) Kaip atrodys grafikas, jei pateiksite U priklausomybę nuo 1/*r*?

A	A	B	C	D	E	F	G	H
1	**RAKETOS JUDĖJIMO MODELIAVIMAS**							
2	**Pokytis Dt =**		1,5	sekundė	**masė/s =**	60	kg/s	
3	**Pradinis greitis =**		0		**DM =**	90	kg	
4	**Dujų greitis Ve =**		4000					
5	**Raketos masė M =**		40000					
6			**Algoritmai**		**V=V+DV**	**M=M–DM**	**DV=Ve × DM/M**	
7								
8	t	M	DV	V				
9	0	40000	9,0000	0,0000				
10	1,5	39910	9,0203	9,0000				
11	3	39820	9,0407	18,0203				
12	4,5	39730	9,0612	27,0610				
13	6	39640	9,0817	36,1221				
14	7,5	39550	9,1024	45,2039				

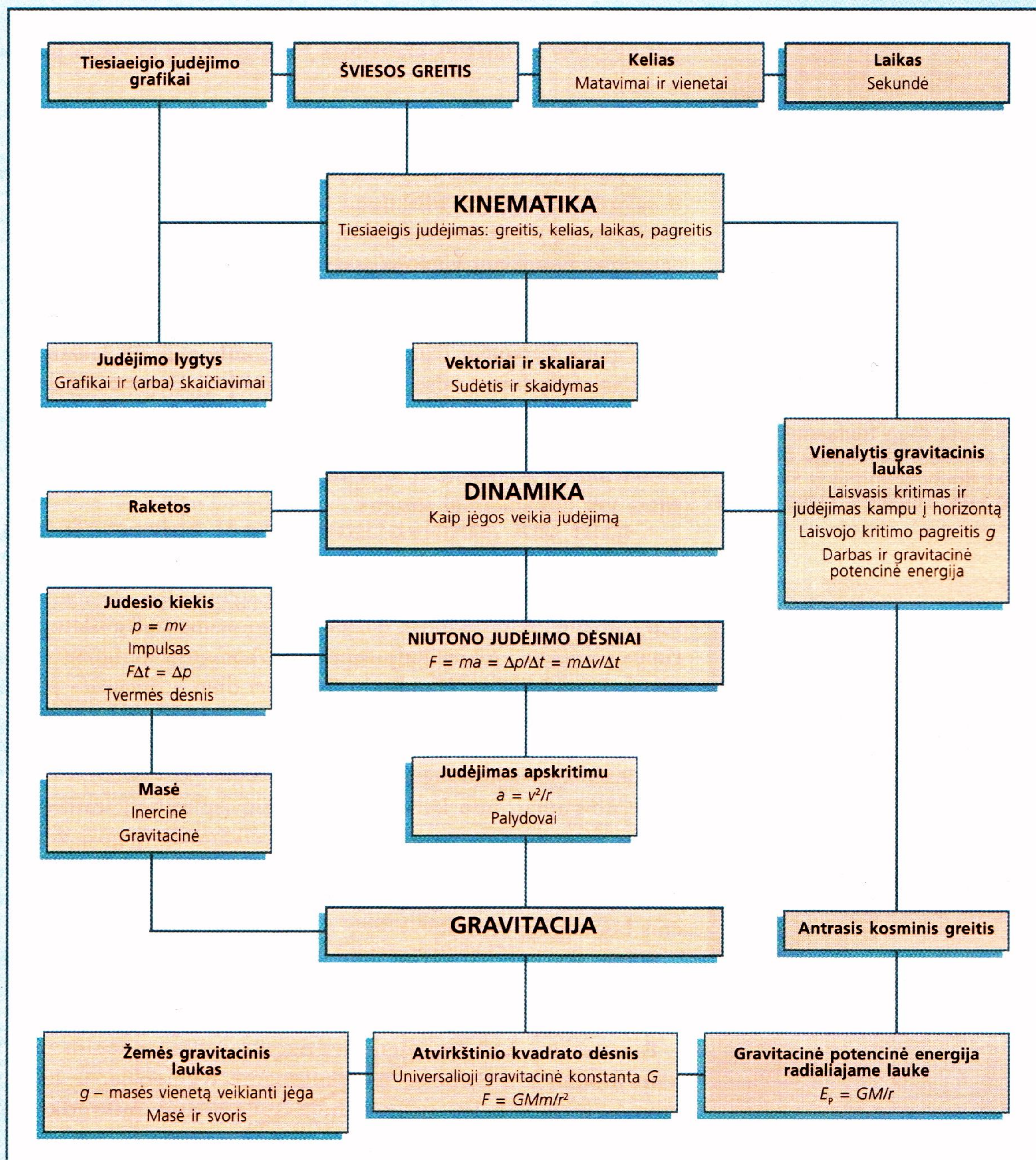
4.U2 pav.

JĖGA IR JUDĖJIMAS NIUTONO VISATOJE

Šia schema apibendrinamos svarbiausios sąvokos, aptartos šiuose skyriuose: **2 Judėjimas erdvėje ir laike, 3 Niutono Visata ir 4 Niutono dėsnių taikymas.** Ji aprėpia pagrindines sąvokas ir lygtis, su kuriomis susipažinote šiuose skyriuose, nurodomi jų tarpusavio saitai ir priklausomybės. Šrifto dydis atspindi sąvokų hierarchiją: stambiausiu šriftu užrašytos pagrindinės sąvokos, smulkesniu – papildomos sąvokos.

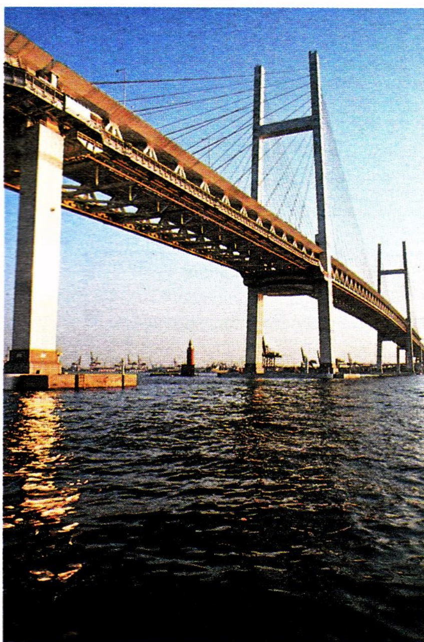
Pagal šią schemą jūs galite pasitikrinti, kaip pagrindinės šioje knygoje aptartos temos atitinka tai, ką jūs turite žinoti ir suprasti pagal savo mokymosi programą.

Peržiūrėję schemą išsiaiškinsite, kurias sąvokas ir matematinius metodus tvirtai žinote. Taip pat sužinosite, kurias sąvokas dar turėtumėte pastudijuoti, taip pat tokias, kurias nuodugniau pasiaiškinę lengviau galėtumėte suvokti silpniau įsisavintas sritis.



2 3 4 skyriai

5 Medžiagos ir jėgos: konstrukcijos ir mikrodariniai



Tokijo įlankos tiltas. Jo 570 metrų ilgio tarpatramis yra daug trumpesnis nei ilgiausio pasaulyje kabančiojo tilto, jungiančio Honšu (*Honshu*) ir Šikoku (*Shikoku*) salas Japonijoje (1990 metrų)

TAKOMOS SĄSIAURIO TILTAS Vašingtono valstijoje buvo atidarytas 1940 metais. Jis sugriuvo prastovėjęs vos keturis mėnesius – ne dėl Žemės drebėjimo, bet paprasčiausiai dėl to, kad buvo blogai sukonstruotas. Paaiškėjo, kad jis nepajėgė atlaikyti tokių apkrovų, kurias turėjo atlaikyti pučiant stipriems vėjams.

Būtinumas suprasti, kaip veikiant jėgoms elgiasi medžiagos, yra gyvybės ar mirties klausimas tiesiogine šio posakio prasme.

Tačiau inžinieriai žino, kad statydami tokius masyvius statinius negali pasikliauti vien teorija. Jie turi mokytis iš anksčiau padarytų klaidų ir prieš pradėdami statyti privalo tikrinti savo konstrukcijas atlikdami bandymus su iki mažiausių smulkmenų tiksliais modeliais. Po to dar atliekama daug saugumo bandymų visuose statybų etapuose.

Šie bandymai kartais būna labai įspūdingi. Japonai, pastatę savo naują kabantįjį tiltą virš Tokijo įlankos, iš 60 metrų aukščio mėtydavo į tilto tarpatramių vidurį šimtą tonų sveriančius kūjus. Smūgio sukeltos bangos sklisdavo tiltu pirmyn ir atgal versdamos jį suktis kaip kamščiatraukį. Tik po to, kai konstrukcija atlaikė tokį apšaudymą, buvo nuspręsta, kad tiltas yra pakankamai saugus.

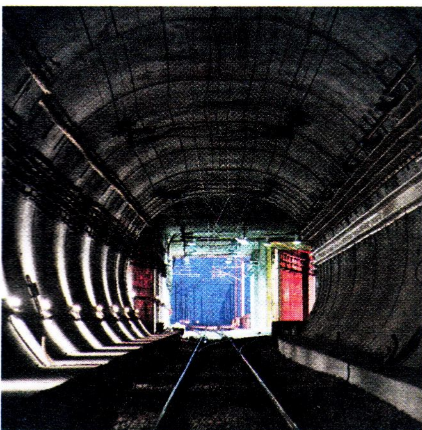
Šio skyriaus sąvokos

Kai kalbame apie statinius, dažnai prisimename milžiniškus inžinerinius projektus, tokius kaip tunelis po Lamanšu, jungiantis Britaniją ir Prancūziją, ar Hamberio (*Humber*) tiltas – ilgiausias pasaulyje kabantysis tiltas, tarp kurio atramų yra 1410 metrų. Galime prisiminti ir aukščiausią pasaulio pastatą – *Sears* pastatą Čikagoje (įskaitant televizijos antenas, jo aukštis lygus 520 metrų).

Dėsningumai, nuo kurių priklauso šių įspūdingų statinių stiprumas ir atsparumas, taip pat juos veikiančios jėgos, veikia ir esant daug mažesniems masteliams, kai kalbama apie puodukus ir lėkštutes, žvejybinį valą, teniso raketes ar netgi gyvūnų griaučius bei augalų stiebus.

Šiame skyriuje panagrinėsime tokias jėgas, taip pat įvairius kūnus sudarančių medžiagų sudėtį ir savybes, atkreipdami dėmesį į tai, kad visos medžiagos yra sudarytos iš atskirų atomų.

Pamatysime, kad skirtingų medžiagų savybės priklauso nuo to, kaip atomai yra išsidėstę molekuliniame lygmenyje, ir kaip tie atomai ir molekulės susigrupuoja sudarydami **mikrodarinius.**





5.1 pav. **Tos pačios prigimties jėgos veikia ir tunelį po Lamanšu, ir puoduką su lėkštute**

Šiems skirtumams išsiaiškinti naudosime paprastus medžiagas aprašančius modelius, ir palyginsime šiuos modelius su tikrove.

1 STATIKA, ARBA KAIP KONSTRUKCIJOS IŠLIEKA PUSIAUSVYROJE

Didelės konstrukcijos – tiltai ar pastatai – nejuda, arba tik šiek tiek juda pučiant vėjui. Tokius statinius veikia labai didelės jėgos, sukeltos jų pačių masės arba grunto bei kitų tvirtinimo taškų poveikio.

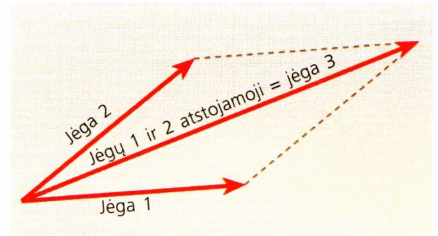
Šias konstrukcijas veikiančios jėgos turi būti pusiausvyroje, t. y. jų *dedamosios* bet kuria kryptimi turi atsverti viena kitą. Jei kūną veikiančios jėgos neatsveria viena kitos, tai pagal antrąjį Niutono dėsnį jos sukelia pagreitį.

Antrasis Niutono dėsnis:
jėga = masė × pagreitis

Pusiausvyrą išlaikančių jėgų, t. y. jėgų, veikiančių nejudančius kūnus, tyrimas yra vadinamas statika.

Jėgos taip pat išlaiko pusiausvyrą, jei kūnas juda tolygiai, t. y. tiesiai ir be pagreičio.

Norint išsiaiškinti, kaip jėgos veikia kūną, reikia išnagrinėti visas tą kūną veikiančias jėgas. Kaip matėte, jėga yra **vektorius:** ji apibūdinama tiek absoliutiniu dydžiu, tiek ir kryptimi. Jei norime sudėti dvi jėgas, braižome jėgų lygiagretainį, kaip parodyta 5.2 pav. **Atstojamoji** jėga atitinka lygiagretainio įstrižainę. Atstojamosios jėgos dydį ir kryptį galime gauti iš brėžinio, atlikto laikantis mastelio, arba kitaip skaičiuoti.



5.2 pav. **Dviejų kūną veikiančių jėgų lygiagretainis. Viena lygiagretainio kraštinė vaizduoja vienos jėgos kryptį ir dydį. Gretima kraštinė vaizduoja kitos jėgos dydį ir kryptį. Lygiagretainio įstrižainė tarp šių kraštinių atitinka atstojamąją jėgą.**

Atstojamosios jėgos skaičiavimas, kai tarp veikiančių jėgų yra statusis kampas

Apskaičiuoti atstojamąją jėgą esti daug lengviau, kai kampas tarp dviejų kūną veikiančių jėgų yra statusis. Pavyzdyje pademonstruoti du būdai, kaip nustatyti atstojamąją jėgą.

PAVYZDYS

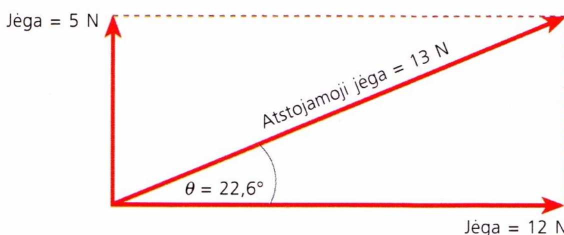
1 Brėžimas laikantis mastelio

5.3 pav. kūno tašką veikiančios jėgos yra atvaizduotos masteliu 1 cm ≡ 2 N.

a) Abi jėgos brėžiamos iš to paties taško.

b) Nubraižomas lygiagretainis (šiuo atveju stačiakampis gretasienis).

c) Iš taško, kurį veikia abi jėgos, nubrėžiama lygiagretainio įstrižainė. Ji vaizduoja atstojamąją jėgą.



2 Skaičiavimai

Kitu būdu atstojamosios jėgos dydį ir kryptį galima nustatyti atliekant trigonometrinius skaičiavimus. Iš Pitagoro teoremos:

$$(\text{atstojamoji jėga})^2 = (5)^2 + (12)^2 = 169$$

(vertės niutonais)

$$\text{atstojamoji jėga} = \sqrt{169} = 13\text{ N}$$

Kampo θ tarp atstojamosios ir 12 N jėgos tangentas lygus 5/12:

θ = arctg (5/12) (arktangentas, atvirkštinis tangentas kalkuliatoriuje)

$= 22{,}6°$

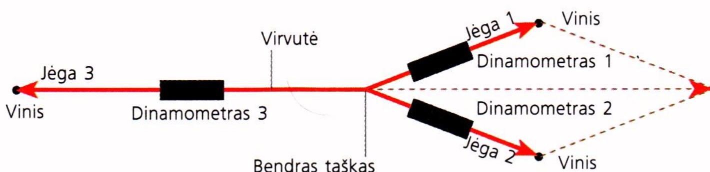
5.3 pav. **Grafinis dviejų statmenų kūną veikiančių jėgų atstojamosios radimas (šio brėžinio mastelis 1:2)**

A a) Persibraižykite 5.4 pav. ir papildomai nubraižykite jėgų lygiagretainius dinamometrų poroms 1 ir 3 bei 2 ir 3. Nurodykite jėgas, kurias vaizduoja atstojamosios.

b) Paaiškinkite, kodėl galime teigti, jog 5.4 pav. pavaizduotos jėgos kompensuojasi.

Jėgos, veikiančios vienoje plokštumoje

Tarkime, tašką veikia trys jėgos. Jų poveikį galime pademonstruoti naudodami tris dinamometrus. Virvutėmis pririšame visus dinamometrus nagrinėjamajame taške, kitus jų galus pritvirtiname trijuose skirtinguose taškuose (5.4 pav.). Trečią dinamometrą veikianti jėga turi būti lygi pirmą ir antrą dinamometrus veikiančių jėgų atstojamajai, tik priešingos krypties. Atstojamąją jėgą vaizduoja lygiagretainio įstrižainė. Analogiškus lygiagretainius galime nubraižyti dinamometrų poroms 1 ir 3 arba 2 ir 3. Atitinkamos atstojamosios savo ruožtu atsvers jėgas, veikiančias 2 ir 1 dinamometrus.



5.4 pav. **Trys viena kitą atsveriančios jėgos**

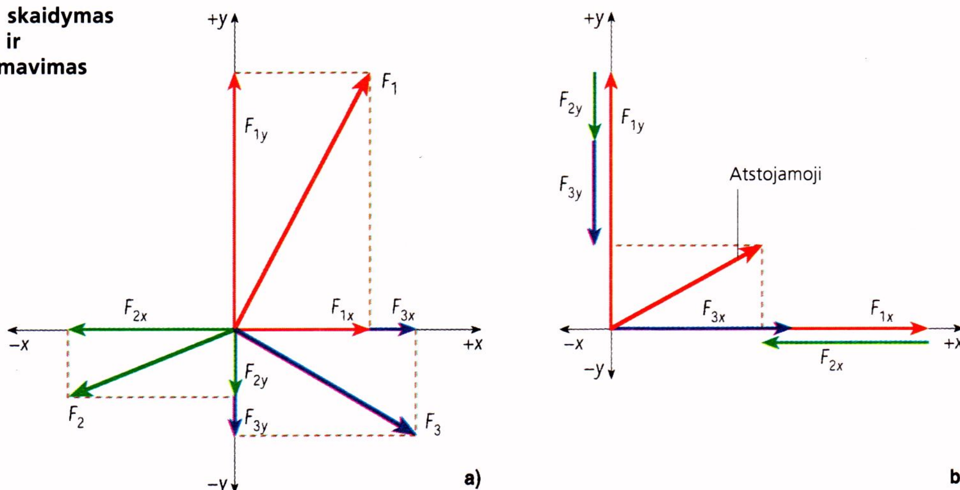
Tarkime, keletas jėgų veikia toje pačioje plokštumoje, ir norime rasti atstojamąją jėgą. Šios jėgos yra **komplanarios** – jas, išlaikant mastelį, galime atvaizduoti vektoriais, nubrėžtais ant popieriaus lapo. Ieškodami atstojamosios, galime suporuoti tas jėgas ir kiekvienai porai nubraižyti jėgų lygiagretainius. Tuo būdu kiekvienai porai gausime atstojamąsias jėgas. Galime vėl imti tų atstojamųjų poras ir kartoti procesą tol, kol liks tik viena bendra atstojamoji. Jei veikiančių jėgų yra daug, tai toks metodas pareikalautų daug laiko ir būtų varginantis.

Geresnis metodas yra visas kūną veikiančias jėgas išskaidyti į dedamąsias dviem statmenomis kryptimis. Atlikdami tai grafiškai brėžinio lape pirmiausia pasižymėkite x ir y ašis ir, laikydamiesi mastelio, nubrėžkite jėgas. 5.5 paveiksle:

- Laikydamiesi mastelio, reikiamomis kryptimis nubrėžkite jėgas F_1, F_2 ir F_3.
- Nubrėžkite dedamąsias F_{1x} ir F_{1y} ašių x ir y kryptimis. Analogiškai nubrėžkite jėgų F_2 ir F_3 dedamąsias.
- Susumuokite jėgas kaip vektorius išilgai x ir y ašių; atkreipkite dėmesį į jų teigiamas ar neigiamas kryptis: 5.5b) pav.
- Išmatuokite gautas atkarpas ir nustatykite atstojamosios jėgos dydį ir kryptį.

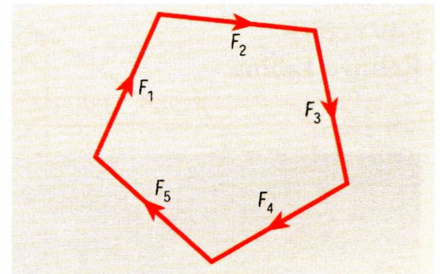
B Burinis laivelis, turintis pakabinamą variklį, patiria jėgas, atsirandančias veikiant vėjui, potvynio srovėms ir varikliui. Variklis veikia laivelį 5 vienetų dydžio jėga, nukreipta į šiaurę, 2 vienetų dydžio potvynio jėga stumia laivelį į šiaurės vakarus, o vėjas veikia bures 3 vienetų jėga šiaurės rytų kryptimi. Grafiškai arba atlikdami skaičiavimus nustatykite atstojamosios jėgos dydį ir kryptį.

5.5 pav. **Jėgų skaidymas į dedamąsias ir dedamųjų sumavimas**



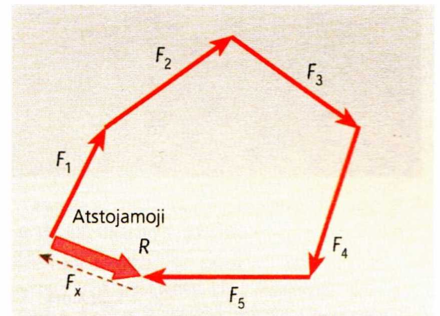
Šį metodą galime taikyti ir jėgoms, veikiančioms trimatėje erdvėje. Tada jėgas skaidome į dedamąsias x, y ir z kryptimis. Tačiau netgi tyrinėdami trimačius tiltus ar pastatus, dažnai nagrinėjame dvimačius skerspjūvius. Todėl čia neapsunkinsime savo analizės trečiuoju matmeniu.

Grįžtant prie jėgų, veikiančių vienoje x–y plokštumoje, atstojamoji jėga turi būti lygi nuliui, jei visos jėgos veikia tą patį kūno tašką ir tas kūnas nejuda arba juda be pagreičio. Kūną veikiančias jėgas galime pavaizduoti vektoriais ir tuos vektorius sujungti taip, kad kiekvienas sekantis prasidėtų ten, kur baigiasi pirmesnysis. *Kūnui, kurį veikiančių jėgų atstojamoji yra lygi nuliui,* šie vektoriai sudarys *uždarojo* daugiakampio kraštines (5.6 pav.).



5.6 pav. **Penkios jėgos, sudarančios uždarąjį daugiakampį. Jei šios penkios jėgos veikia tą patį kūno tašką, jos tarpusavyje kompensuosis ir nesuteiks kūnui pagreičio**

Jei pirmojo ir paskutinio vektorių galai nesusisiekia, tai daugiakampį uždarantis vektorius F_x atitiks jėgõs, kuri reikalinga pusiausvyrai užtikrinti, dydį ir kryptį (5.7 pav.). Jei tokia jėga neveikia, tai atstojamoji jėga R, lygi tam vektoriui, bet nukreipta priešinga kryptimi, suteiks kūnui pagreitį.



5.7 pav. **Nesikompensuojančių jėgų daugiakampis. Atstojamoji jėga *R* veikia priešinga kryptimi nei jėga, kurios reikėtų daugiakampiui uždaryti (t. y. kompensacijos užtikrinti)**

Galime teigti, kad:

Bet koks taškinis keleto jėgų veikiamas kūnas bus pusiausvyroje (t. y. nejudės arba judės tolygiai) tik tuo atveju, kai tų jėgų vektoriai sudaro uždarąjį daugiakampį.

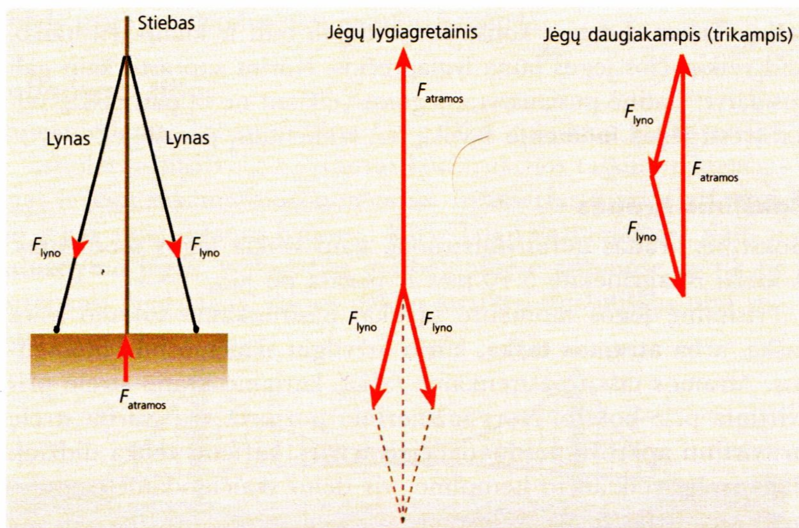
Panagrinėkime, kaip tai pasireiškia praktikoje.

Taškiniu kūnu vadiname kūną, kuris yra toks mažas, jog galime laikyti, kad visos jį veikiančios jėgos veikia tą patį tašką. Dažnai ir didesnį kūną veikiančios jėgos veikia jo masės centrą, todėl galime laikyti, kad toks kūnas yra ekvivalentus vienam taškui.

Radijo antenos stiebas

Stiebas, kaip parodyta 5.8 pav., yra įtvirtintas dviem lynais (atraminėmis atotampomis). Jie veikia stiebą tamprumo jėgomis, tempiančiomis jį žemyn. Jei šias tamprumo jėgas išskaidysime į vertikalias ir horizontalias dedamąsias, tai jėgų diagramoje matysime, kad horizontaliosios dedamosios atsvers viena kitą. Vertikalias dedamąsias atsvers aukštyn nukreipta jėga $F_{atramos}$, kuri atsiranda veikiant atramai ir yra perduodama stiebu aukštyn.

Greta pavaizduotas jėgų lygiagretainis, vaizduojantis šias tris jėgas (F_{lyno}, F_{lyno} ir $F_{atramos}$), ir uždaras jėgų daugiakampis (trikampis, kadangi veikia tik trys jėgos). Praktikoje stiebą laiko dar du lynai kitoje plokštumoje, statmenoje lapo plokštumai. Taigi jėga $F_{atramos}$ turi atsverti visuose keturiuose lynuose veikiančių tamprumo jėgų vertikalias dedamąsias.

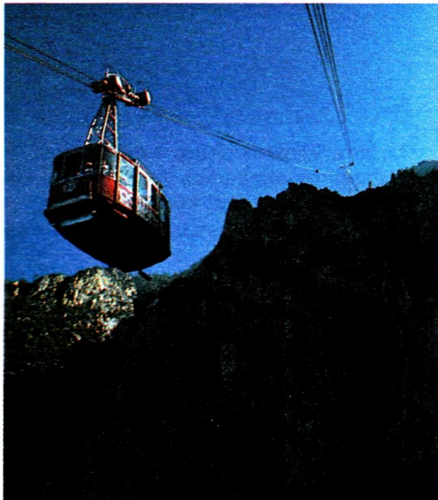


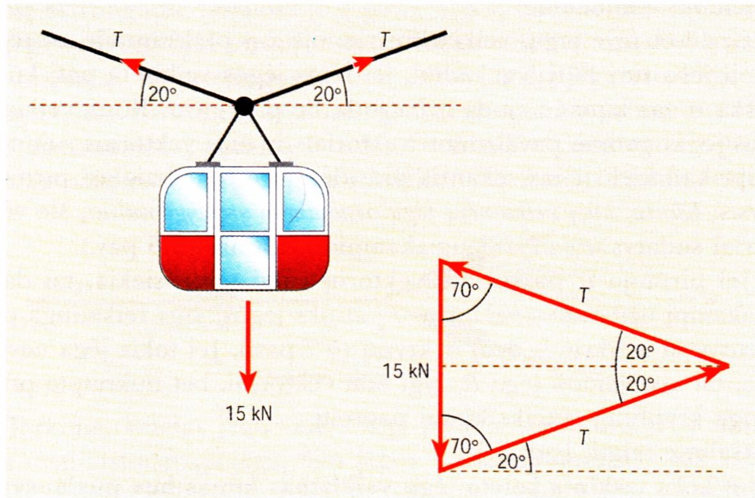
5.8 pav. **Jėgos, veikiančios radijo antenos stiebą vienoje plokštumoje, ir jas atitinkantys jėgų lygiagretainis ir daugiakampis**

PAVYZDYS

Keltuvo kabina

K Keltuvo kabina, kurios bendras svoris lygus 15 kN, yra pakabinta po lynu (5.9 pav.). Įtempimo jėga *T* lyne pasiskirsčiusi tolygiai, o kampai, kuriuos lynas sudaro su horizontu, yra lygūs 20° abiem kryptimis. Koks įtempimo jėgos *T* dydis?





5.9 pav. **Įtempimo jėgos skaičiavimas lyne, kuriuo pakabinta keltuvo kabina**

A *T* vertę galime rasti **grafiškai,** kaip pavaizduota 5.9 pav. Nubrėžkite vertikalią atkarpą, kuri vaizduoja žemyn veikiančią 15 kN jėgą. Iš tos atkarpos vidurio nubrėžkite jai statmeną horizontalią tiesę. Tada iš abiejų vertikaliosios atkarpos galų 70° (90° – 20°) kampu brėžkite linijas iki susikirtimo su horizontaliąja tiese. Taip gausite lygiakraštį trikampį. Šių lygių kraštinių ilgiai atitinka *T* dydį.

T nustatyti gana nesunku ir **atliekant skaičiavimus.** 5.9 pav. pavaizduotame trikampyje matome, kad

$$\sin 20° = (7{,}5\ \text{kN})/T,$$

arba: $T = (7{,}5\ \text{kN})/\sin 20° = 22\ \text{kN}$

Atkreipkite dėmesį, kad įtempimo jėga lyne yra didesnė nei žemyn veikianti jėga dėl vagonėlio svorio.

Žr. 1 klausimą. ■



C Pavyzdyje aprašytas lynas praktiškai dažniausiai sudaro mažesnį kampą su horizontu. Ar tikrai nėra pavojaus, kad kabina bus nusviesta nuo beveik horizontalaus lyno?

Jėgos momentas:

Kai kūnas yra pusiausvyroje, jėgos momentų suma, sukanti kūną apie ašį (atramos tašką) prieš laikrodžio rodyklę, yra lygi pagal laikrodžio rodyklę veikiančių jėgos momentų sumai. Pavyzdžiui, kai *M* ir *m* yra matuojama niutonais, o *x* ir *y* yra metrais:

$$M_1x_1 + M_2x_2 = m_1y_1 + m_2y_2 \text{ (Nm)}$$

x_1 y_1 x_2 y_2 M_1 M_2 m_1 m_2

Jei kūnas yra **statinėje pusiausvyroje,** tai jį veikiančių jėgų atstojamoji yra lygi nuliui ir jis nejuda arba juda pastoviu greičiu.

Jėgos, veikiančios ne tą patį tašką: jėgos momento atsiradimas

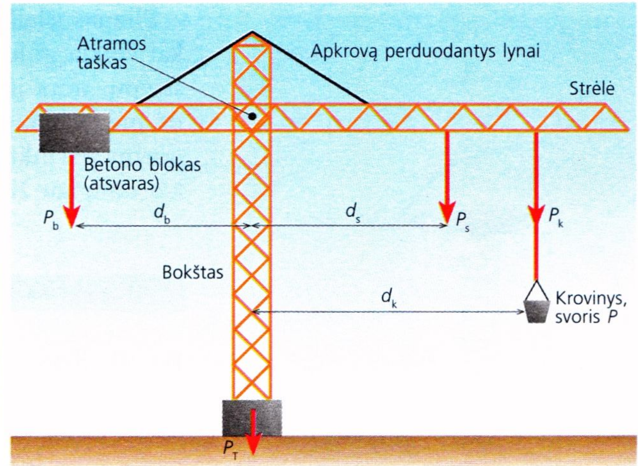
Visuose anksčiau pateiktuose pavyzdžiuose jėgos veikdavo tą patį tašką. Tačiau didelėse konstrukcijose gali būti ir kitaip. Pasitaiko, kad veikiančios jėgos būna lygiagrečios. Norint suprasti, kaip gali susidaryti statinė pusiausvyra, jėgoms veikiant ne tą patį tašką, reikia įvesti **jėgos momento** sąvoką (žr. komentarą paraštėje).

Bokštinis kranas

Bokštinis kranas gerai iliustruoja, kaip veikia jėgos momentas. Atidžiai išnagrinėkite 5.10 pav. ir parašą po juo.

Prisiminę jėgos momento sąvoką, pasirenkame sukimo ašies tašką, arba **atramos tašką,** kurio atžvilgiu skaičiuosime momentus. Atramos tašku pasirenkame tašką, kuriame krano strėlė pritvirtinta prie bokšto. Nors inžineriniu požiūriu yra svarbu strėlę pritvirtinti apkrovą perduodančiais lynais, kuriems tenka didžioji dalis strėlę veikiančio įtempimo, vis dėlto skaičiuodami momentus į tuos lynus neatsižvelgsime.





5.10 pav. **Bokštinis kranas ir svarbiausios jį veikiančios jėgos. Dėl bokštą veikiančios gravitacijos atsiranda žemyn nukreipta jėga P_T, kuri veikia bokšto pagrindą.**

Horizontali strėlė atsikišusi į abi puses nuo bokšto. Tačiau atkreipkite dėmesį, kad strėlė toliau išsikiša į tą pusę, kur keliamas krovinys. Taigi strėlės masės centras yra atstumu d_s į krovinio pusę, ir tame taške jį veikia žemyn nukreipta jėga P_s, atsirandanti dėl strėlės svorio. Apkrovą perduodantys lynai papildomai prilaiko strėlę.

Krovinys P keliamas atstumu d nuo bokšto centro. Betoninis blokas, veikiantis kaip atsvaras, yra atstumu d_b į kitą pusę ir sukuria žemyn nukreiptą jėgą P_b

Galime manyti, kad lynai išdėstyti simetriškai ir įtempimai kiekviename iš jų yra vienodi. Pagal momentų taisyklę gauname:

$$\underbrace{P_b \times d_b}_{\text{Betono blokas}} = \underbrace{(P_s \times d_s)}_{\text{Strėlė}} + \underbrace{(P_k \times d_k)}_{\text{Krovinys}}$$

Kad kranas išliktų pusiausvyroje ir neapvirstų, bloko sukamąjį momentą lygties kairėje turi atsverti strėlės ir krovinio sukamųjų momentų suma dešinėje.

Pažvelgę į veikiantį bokštinį kraną galite pastebėti, kad krovinys perkeliamas į reikiamą vietą ne tik sukant kraną, bet ir stumdant krovinį artyn ar tolyn nuo atramos taško. Taip krovinys pastumiamas į tašką, neatitinkantį mūsų apskaičiuotos pusiausvyros padėties.

Dabar akivaizdu, kodėl reikalingi lynai. Kai krovinys perkeliamas tolyn nuo pusiausvyros padėties, lynų įtempimai kinta – persiskirsto taip, kad sukamieji momentai išliktų pusiausvyroje. Jėgas skersiniuose lynuose turi atsverti jėgos, atsirandančios krano bokšte. Atsvarą sudarantį betono bloką galima pastumti, tačiau jo padėties neįmanoma nuolatos taip kaitalioti, kad jo masė tiksliai atsvertų krovinį. Be to, krano dalys bus deformuojamos (tempiamos arba sukamos) ir taip atsiras naujos jėgos, „amortizuojančios" veikiančias jėgas. Tada skaičiavimai tampa sudėtingi. Praktikoje bokštinių kranų stabilumas yra išbandomas su įvairiais kroviniais prieš pradedant eksploatuoti kranus.

Kabantysis tiltas

Projektuodamas kabantįjį tiltą, pavyzdžiui, tokį kaip 5.11 paveiksle, inžinierius atsižvelgia į įvairius konstrukcijos taškus veikiančias jėgas ir jėgų sukamuosius momentus. Inžinierius ištyrinėja **tempimo jėgas** plieniniuose lynuose, kurie laiko važiuojamąją dalį, ir **gniuždymo jėgas,** veikiančias gelžbetoninėse atramose, ir tik po to renkasi medžiagas, kurios galėtų atlaikyti milžiniškas tiltą veikiančias jėgas.

?

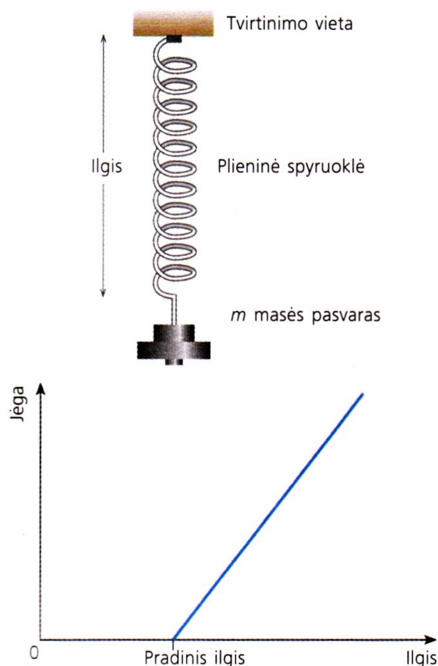
D Bokštiniu kranu keliamas 1500 kg masės krovinys. 12 m atstumu d_b nuo krano atramos taško esančio betoninio atsvaro masė yra 2000 kg. Krano strėlės sukelta žemyn nukreipta jėga P_s, lygi 4000 N, veikia 3 m atstumu d_s nuo atramos taško. Kokiu atstumu nuo atramos taško turi būti keliamas krovinys, kad kranas būtų pusiausvyroje?

E Aprašykite (ne matematiškai) jėgas, kurios veikia įvairias 5.11 pav. atvaizduoto tilto dalis. Nurodykite, kurios dalys yra tempiamos, kurios gniuždomos. Panagrinėkite, kaip pasiekiama statinė pusiausvyra. Kad išliktų pusiausvyra, tašką veikiančios jėgos turi atsverti vienos kitas. Sukamieji momentai bet kurio taško atžvilgiu irgi turi susikompensuoti. (Nagrinėkite tik tas jėgas, kurios veikia brėžinio plokštumoje.)



5.11 pav. **Kabančiojo tilto konstrukcija**

Plienas išlaiko dideles įtempimo jėgas, o betonas tinka tik tada, kai veikia gniuždymo jėgos. Inžinierius nekabins tilto ant betono strypų, nors įterpus į betoną armatūrinį plieną gaunama sudėtinė medžiaga, atlaikanti ne tik gniuždymą, bet ir tempimą. Aišku, norint parinkti tinkamiausią medžiagą konkrečiam taikymui, reikia daugiau žinoti apie medžiagų savybes.



5.12 pav. **Sąryšis tarp veikiančios jėgos ir plieninės spyruoklės ilgio, kai galioja Huko dėsnis**

Spyruoklės gaminamos ne tik iš plieno. Kiekvienai medžiagai tokiame grafike egzistuoja tiesinės priklausomybės sritis, bet skirtingų medžiagų spyruoklėms tiesės *polinkis* būtų skirtingas. Pavyzdžiui, spyruoklėms, pagamintoms iš kai kurių medžiagų, reikia žymiai didesnės jėgos, kad sukeltų ekvivalentų pailgėjimą, todėl tiesės polinkis tokioms medžiagoms būtų statesnis

?

F a) Tarkime, gaunate sąryšio tarp jėgos ir ilgio grafikus keletui *skirtingų* spyruoklių, pagamintų iš to paties metalo. Tų spyruoklių skerspjūviai ir pradiniai ilgiai gali būti skirtingi. Kaip manote, ar tiesių polinkiai ir susikirtimo su ašimi taškai bus vienodi visoms spyruoklėms? Atsakymą pakomentuokite.

b) Perskaitykite parašą po 5.12 pav., persibraižykite grafiką ir pridėkite dar vieną liniją, vaizduojančią atitinkamą priklausomybę tokio pat pradinio ilgio spyruoklei, pagamintai iš tokios medžiagos, jog pakanka mažesnės jėgos, kad ji pailgėtų tiek pat, kiek ir plieninė spyruoklė.

2 HUKO (*HOOKE*) DĖSNIS IR SPYRUOKLĖS

Beveik visos anksčiau nagrinėto tilto dalys yra pagamintos iš kietų medžiagų, kaip sakoma, iš kietųjų kūnų. Jėgų veikiami kietieji kūnai išlaiko savo formą. Kad išsiaiškintume, kodėl jie išlaiko formą, panagrinėsime sąveiką tarp tuos kūnus sudarančių atomų ir molekulių. Kietuosius kūnus veikianti tempimo jėga, arba tiesiog tempimas, atitolina atomus arba molekules vienus nuo kitų. Paprastai tempimas yra kur kas silpnesnis už tas milžiniškas jėgas, kurios riša atomus. Atitinkamai gniuždymo jėgos stumia atomus artyn vienas kito, tačiau tada tarp atomų atsiranda stiprios stūmos jėgos.

Taigi kai tokį kietąjį kūną veikia jėga, jis vienaip ar kitaip deformuojasi. Jei tai tempimo jėga, kūnas ištįsta. Šis kūno pailgėjimas yra proporcingas veikiančiai jėgai. Tai pirmasis pastebėjo Robertas Hukas (*Robert Hooke,* 1635–1703) tyrinėdamas spyruokles. Hukas aptiko šį dėsnį, nes jo gyvenamu laikotarpiu jau buvo gaminamos spyruoklės, tačiau tas pats efektas stebimas ir tempiant vielą ar strypą, tik tuomet pailgėjimas būna daug mažesnis.

Pradėkime nuo spyruoklių. Kai spyruoklę veikia jėga, vijos tolsta viena nuo kitos, ir spyruoklė išsitempia. Hukas suformulavo savo dėsnį spyruoklėms taip:

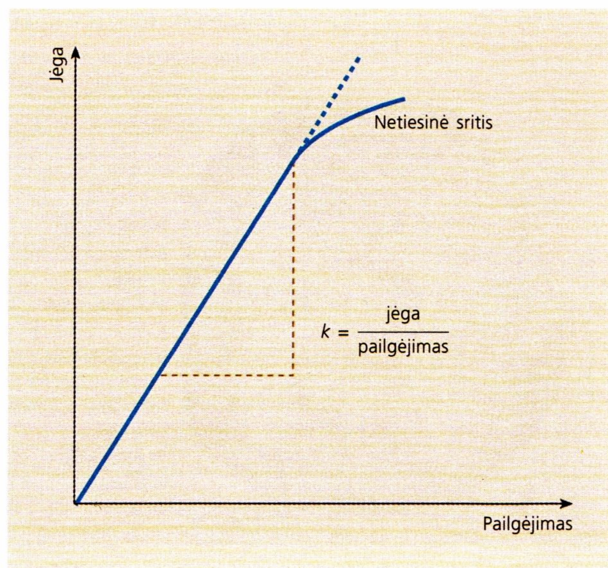
Pailgėjimas yra proporcingas jį sukėlusiai jėgai.

5.12 paveiksle pavaizduotas sąryšis tarp veikiančios jėgos ir tipiškos plieninės spyruoklės ilgio. Tarkime, spyruoklę tempsime šitaip: vieną jos galą pritvirtinsime, o kitame gale kabinsime vis didesnės masės svarmenis. Keisdami svarmens masę, tuo pačiu ir spyruoklę veikiančią jėgą, išmatuosime spyruoklės ilgį. Laisvai keičiami dydžiai paprastai atidedami grafiko x ašyje, o priklausomai nuo jų kintantys matuojami dydžiai – y ašyje. Tačiau šiuo atveju laisvai keičiamas dydis – jėga – atidėta y ašyje, o nuo jos priklausantis ilgis, kurį matuojame, – x ašyje (5.12 pav.).

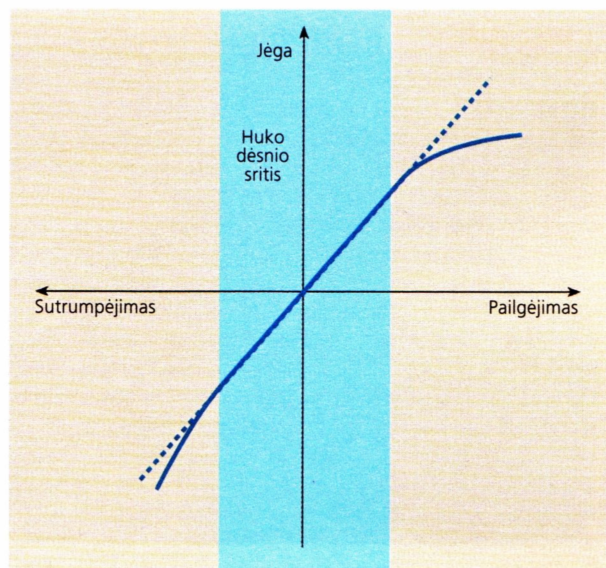
Įdomu pastebėti, kad grafike pavaizduota priklausomybė yra tiesinė, *jei veikianti jėga nėra labai didelė.* Tiesė rodo, kad prie pasvaro pridedant vienodos masės svarmenis spyruoklė pailgėja kaskart tuo pačiu dydžiu. Jei jėga bus per didelė, tą jėgą pašalinus spyruoklė nebeatgaus pradinės formos. Sakoma, kad peržengta **tamprumo riba,** ir Huko dėsnis jau negalioja.

Galime perpiešti grafiką taip, kad būtų pavaizduotas sąryšis tarp jėgos ir spyruoklės **pailgėjimo,** t. y. jos ilgio *pokyčio* (tai vadinama **deformacija,** t. y. formos pasikeitimu). Naujasis grafikas pateiktas 5.13 pav. Tiesinėje priklausomybės dalyje turime:

$$\text{Polinkis} = \frac{\text{jėga}}{\text{pailgėjimas}}$$



5.13 pav. **Jėgos sąryšio su spyruoklės pailgėjimu grafikas**



5.14 pav. **Spyruoklės suspaudimas ir ištempimas. Huko dėsnio galiojimo sritis yra tiesė be lūžių, tačiau atkreipkite dėmesį, kad teigiama ir neigiama sritys nėra simetriškos: nesutampa nei tiesinių dalių ilgiai, nei netiesinių dalių kreivumai**

Galime susieti jėgą F ir pailgėjimą x įvesdami konstantą k:

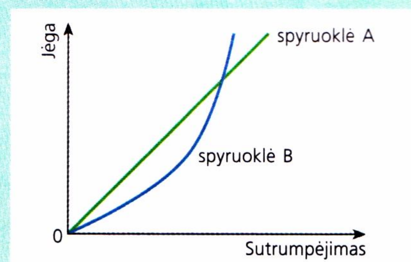
$$\boldsymbol{F = kx},$$

kur k yra tiesinės grafiko dalies polinkis. k yra **tamprumo,** arba **jėgos konstanta.** Jos dimensija lygi jėgos dimensijai, padalytai iš ilgio dimensijos, t. y. iš $\mathrm{N \cdot m^{-1}}$.

Spyruoklę galima ne tik ištempti, bet ir suspausti. Galima suspaudimą traktuoti kaip neigiamos jėgos sukeltą neigiamą deformaciją, ir ilgio *sumažėjimą* atvaizduoti neigiama x ašies kryptimi. Spyruoklės tempimas ir suspaudimas atvaizduotas 5.14 pav. ir aprašytas paraše po juo. Grafiko polinkis Huko dėsnio galiojimo srityje yra toks pat ir tempiant, ir suspaudžiant spyruoklę.

„Netiesinės" spyruoklės

Spyruoklės paprastai daromos kiek galima tampresnės, t. y. stengiamasi, kad sąryšis tarp jėgos ir pailgėjimo būtų tiesiškas kiek galima platesniame pailgėjimo ir sutrumpėjimo ruože. Tačiau kai kurios spyruoklės daromos taip, kad didėjant jėgai jas suspausti būtų vis sunkiau ir sunkiau. Tokias spyruokles galima panaudoti vibruojantiems mechanizmams stabilizuoti. Tokių spyruoklių sutrumpėjimas nėra tiesiog proporcingas apkrovai (veikiančiai jėgai), kaip 5.15 pav. pavaizduotos spyruoklės A, bet, didėjant apkrovai, mažėja, kaip ir spyruoklės B.

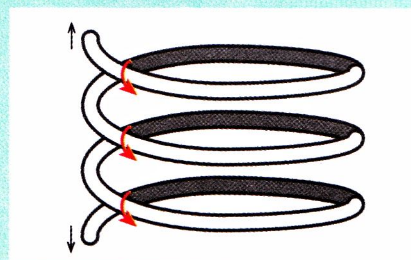


5.15 pav. **Spyruoklei A galioja Huko dėsnis. Spyruoklė B yra netiesinė – didėjant jėgai, ją suspausti darosi sunkiau**

Sraigtinė spyruoklė

Sraigtinė spyruoklė parodyta 5.16 pav. Ją sudaro spirale suvyniota viela. Ištempta spyruoklė pailgėja, nes kiekviena vija pasisuka.

Huko dėsnis aprašo spyruoklės tiesinę deformaciją (formos kitimą viena kryptimi). Tačiau, kaip matysime vėliau, jis galioja ir aprašant strypų ar kitos formos kūnų tiesinę deformaciją. Be to, šis dėsnis galioja ir esant kitokioms deformacijos rūšims, pavyzdžiui, sukimui – **sąsūkos deformacijai** – tačiau tik tol, kol apkrova yra maža.

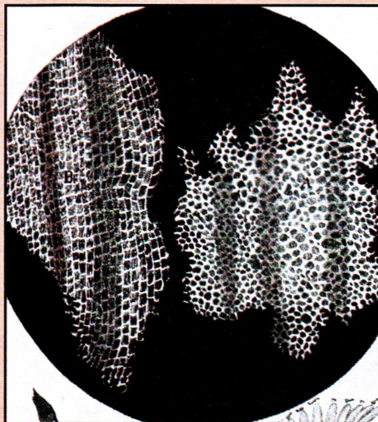


5.16 pav. **Sraigtinės spyruoklės ištempimas**

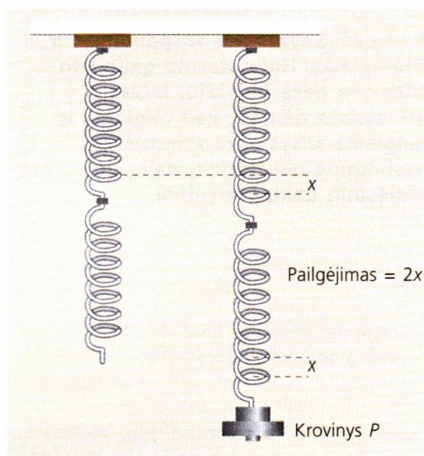
ROBERTAS HUKAS (*ROBERT HOOKE*, 1635–1703)

ROBERTAS HUKAS buvo dvasininko sūnus. Jis atvyko į Oksfordą kaip choristas, tačiau pasinėrė į mokslus ir tapo Roberto Boilio (*Robert Boyle*) asistentu, konstravo ir tobulino jam oro siurblį. 1660 metais jis persikėlė į Londoną, tapo Karališkosios Draugijos (*Royal Society*), kuri buvo sukurta skatinti mokslo žinių vystymą, nariu steigėju ir jos „eksperimentų kuratoriumi". Dabar jo vardu vadinamą dėsnį nustatė 1678 metais.

Jis buvo ne tik išradingas eksperimentatorius, bet ir puikiai gebėjo sugalvoti ir pagaminti mokslinius prietaisus (jis sugalvojo pirmą spyruoklę paremtą balansinį ratuką laikrodžiui). Huko darbai gravitacijos tyrimo srityse padėjo Niutonui aptikti gravitacijos dėsnį. Biologijoje jis gavo pripažinimą už tyrimus panaudojant mikroskopą. 1665 m. Hukas išleido „*Micrographia*" – knygą, kurioje buvo pateikta daug nuostabių mikroskopinių stebėjimų piešinių ir jo darbo optikos srityje detalių.



5.17 pav. **Piešinys iš Roberto Huko knygos „Mikrografija", kur pavaizduotos kamštmedžio ląstelės, kaip per savo mikroskopą jas matė Hukas**

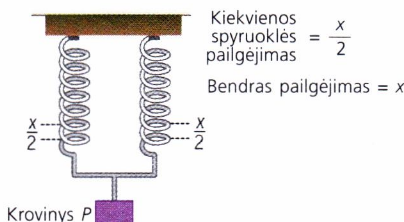


5.18 pav. **Nuosekliai sujungtos spyruoklės. Abiejų spyruoklių įtempimo jėgos ir pailgėjimai vienodi. Bendras pailgėjimas lygus 2*x***

Žr. 2 klausimą.



G Krovinys pakabintas ant kelių nuosekliai sujungtų identiškų spyruoklių. Kaip pasikeis tų spyruoklių pailgėjimas, jei bus nuosekliai prikabinta dar viena tokia spyruoklė, o krovinys išliks tas pats?



5.19 pav. **Lygiagrečiai sujungtos spyruoklės. Krovinys veikia abi spyruokles, todėl kiekvieną iš jų veikianti įtempimo jėga ir jų pailgėjimas yra perpus mažesni nei nuoseklaus jungimo atveju. Pailgėjimų suma lygi *x***

Nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtos spyruoklės

Krovinį galima pakabinti ant keleto sujungtų spyruoklių. Efektyvioji spyruoklių sistemos jėgos konstanta k priklausys nuo to, kaip tos spyruoklės sujungtos. 5.18 pav. dvi identiškos spyruoklės sujungtos nuosekliai:

- Kiekviena spyruoklė turi savo jėgos konstantą k (jėga F yra lygi kx).
- Jei krovinys P pakabinamas po žemutiniąja spyruokle, tai jėga F veikia abi spyruokles.
- Pasinaudoję sąryšiu $x = F/k$ galime rasti kiekvienos spyruoklės pailgėjimą x.
- Bendras pailgėjimas lygus $2x$.

Taigi **nuosekliai sujungtų spyruoklių** sistemos jėgos konstanta k_s yra tokia:

$$k_s = \frac{\text{jėga}}{\text{bendras pailgėjimas}} = \frac{F}{2x} = \frac{kx}{2x} = \frac{k}{2}$$

5.19 pav. pavaizduotos tos pačios dvi spyruoklės, laikančios tą patį krovinį. Tačiau dabar jos sujungtos lygiagrečiai:

- Krovinio P sukelta jėga pasiskirsčiusi tarp spyruoklių, todėl kiekvienai tenka įtempimo jėga $F/2$.
- Kiekvienos spyruoklės pailgėjimą nusako įtempimo jėga, padalyta iš spyruoklės konstantos, t. y. $F/2$, padalyta iš k. Todėl pailgėjimas lygus $F/2k$.
- Pailgėjimas $F/2k$ yra dviejų lygiagrečiai sujungtų spyruoklių pailgėjimas.

Kaip ir galima tikėtis, gautasis pailgėjimas yra perpus mažesnis nei būtų, jei kūną pakabintume ant vienos spyruoklės. **Lygiagrečiai sujungtų** spyruoklių jėgos konstanta k_p yra tokia:

$$k_p = \frac{\text{jėga}}{\text{pailgėjimas}}$$

Įrašę vietoj jėgos F sukelto pailgėjimo $F/2k$, gausime

$$k_p = \frac{F}{F/2k} = 2k$$

Matavimai naudojantis spyruoklėmis





5.20 pav. **Spyruoklinės svarstyklės (kairėje) ir dinamometras (dešinėje)**

Spyruoklės naudojamos daugelyje jėgos matavimo prietaisų, pavyzdžiui, spyruoklinėse svarstyklėse ir dinamometruose. Kūno svoris yra proporcingas jo masei, todėl spyruoklinių svarstyklių skalę galima sugraduoti masės vienetais. Dinamometrai sugraduoti jėgos vienetais. Šiuose dviejuose prietaisuose skiriasi tik skalės padalos ir žymėjimai, nors jie skirti skirtingiems fizikiniams dydžiams. Abu prietaisai sugraduoti veikiant etaloninėmis jėgomis; paprastai tai būna gravitacijos jėgos, veikiančios etalonines mases.

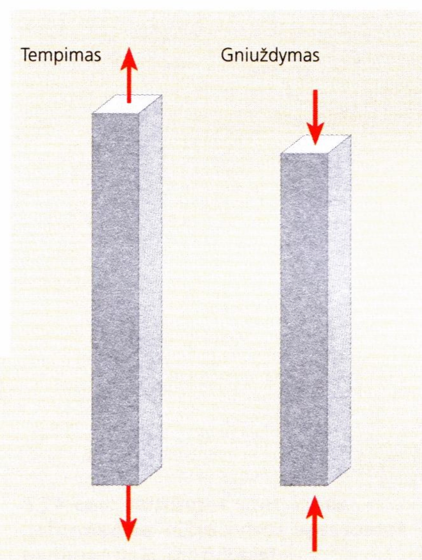
3 DEFORMACIJĄ SUKELIANČIOS JĖGOS

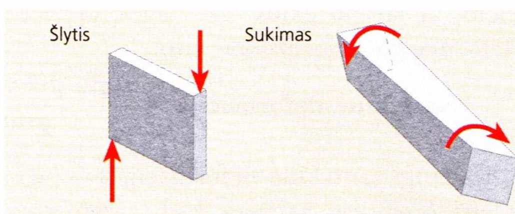
Jau žinome: kad veikiant jėgai medžiaga deformuotųsi, nebūtina iš jos gaminti spyruoklę. Dauguma kūnų, veikiami jėgos, šiek tiek deformuojasi. Jėgos gali veikti skirtingomis kryptimis ir įvairių formų kūnus. Tam tikrose ribose Huko dėsnis galioja daugumai įprastinių medžiagų: gumai, stiklui, medienai, metalams. Tačiau kai kurioms medžiagoms, pavyzdžiui, moliui ar plastilinui, šis dėsnis iš viso netinka, nes jų forma labai pakinta veikiant jėgai.

5.21 paveiksle parodytos kūną veikiančių jėgų poveikio rūšys:

- **Tempimas** – jėgos veikia į išorę priešingomis kryptimis ir verčia kūną ilgėti.
- **Gniuždymas** – jėgos iš priešingų pusių nukreiptos į kūną ir verčia jį trumpėti.
- **Šlytis** – jėgos veikia priešingomis kryptimis išilgai lygiagrečių plokštumų ir verčia lygiagrečias kūno dalis slysti viena kitos atžvilgiu.
- **Sukimas** – šlyties atmaina, kai viena kūno dalis sukama kitos atžvilgiu.

Apkrauta konstrukcija gali būti vienu metu deformuojama keliais skirtingais būdais. Kūno atsakas į veikiančią jėgą priklauso nuo jo





5.21 pav. **Kūną veikiančios jėgos, sukeliančios tempimą, gniuždymą, šlytį ir sukimą**



5.22 pav. **Betoninis automobilių tiltas ir geležinis geležinkelio tiltas per Temzę. Projektuodami tiltus ir rinkdamiesi jiems medžiagas inžinieriai atsižvelgia į visas jėgas ir jų poveikius**

dydžio, formos ir medžiagos, iš kurios jis pagamintas. Stipri atrama gali būti ir plona kolona iš tvirtos medžiagos, ir storesnė kolona iš silpnesnės medžiagos. Pavyzdžiui, skirtingos akmens ir geležies savybės nulėmė dviejų 5.22 pav. parodytų tiltų konstrukcijos skirtumus.

Ne tik akmens kietumas ar geležies standumas lemia jų reakciją į veikiančias jėgas. Kitas svarbus faktorius yra medžiagos tankis. Tiltai turi išlaikyti ne tik jais važiuojančias transporto priemones, bet ir savo nuosavą svorį, kuris gali būti daug kartų didesnis už veikiančią transporto apkrovą.

Įtempis ir santykinė deformacija

Kas tvirtesnis – tilto sija ar puodelis? Jų neįmanoma tiesiogiai palyginti, kadangi šie daiktai padaryti iš skirtingų medžiagų, o jų dydžiai ir formos irgi yra labai skirtingi. Prieš lyginant kūnų savybes reikia palyginti juos sudarančių medžiagų savybes. Tam vartojame fizikinius dydžius, vadinamus **įtempiu** ir **santykine deformacija.**

Įtempis susijęs su veikiančia jėga ir plotu, kurį ta jėga veikia:

$$\textbf{Įtempis} = \textbf{jėga, veikianti ploto vienetą} = \frac{\textbf{jėga}}{\textbf{plotas}} = \frac{F}{A}$$

Įtempio matavimo vienetas yra $\mathrm{N \cdot m^{-2}}$. Atkreipkite dėmesį, kad tai ta pati dimensija, kaip ir slėgio.

Visuose 5.23 pav. atvaizduotuose pavyzdžiuose jėga veikia tam tikrą plotą. Taigi visais atvejais kūną veikia įtempis. Veikiant įtempiui pakinta kūnų forma. Kai norime šį pokytį išmatuoti, palyginame kūno dydį ar formą veikiant įtempiui su jo dydžiu ar forma prieš tą poveikį. **Santykinė deformacija** ir yra fizikinis dydis, įgalinantis palyginti tuos dydžius. Tikslus santykinės deformacijos apibrėžimas priklauso nuo jos tipo.

Paprasčiausias atvejis – tempimo jėgos, veikiančios priešingus vielos ar strypo galus. Šios jėgos sukelia pailgėjimą, ir santykinę deformaciją apibrėžiame taip:

$$\textbf{Santykinė deformacija} = \frac{\textbf{ilgio pokytis (pailgėjimas)}}{\textbf{pradinis ilgis}}$$

Kadangi santykinė deformacija yra lygi dviejų ilgių santykiui, ji *neturi dimensijos*. Sakoma, kad tai bedimensis dydis. Santykinę de-

formaciją galime išreikšti ir kaip ilgio pokytį procentais, jei ją aprašantį santykį padauginsime iš 100.

Tie patys įtempio ir santykinės deformacijos apibrėžimai galioja ir tuo atveju, kai kūną veikia gniuždymo jėga.

Dabar panagrinėkime, kas atsitiks, jei tokia pat jėga paveiksime dvi skirtingo skerspjūvio vielas, kaip parodyta 5.23a) pav. Nors jėga abiem atvejais yra ta pati, didesnio skerspjūvio vielą veiks mažesnis *įtempis,* ir šios vielos pailgėjimas bus mažesnis. Jei norime ištempti storesniąją vielą tiek pat, kiek ir plonesniąją, turime, kaip parodyta 5.23b) pav., panaudoti didesnę jėgą: kad pailgėjimas būtų vienodas, jėgų santykis turi būti toks pat kaip skerspjūvių santykis – tada abiejų vielų įtempis bus toks pats.

Dabar aišku, kodėl su konstrukcinėmis medžiagomis dirbantys inžinieriai, lygindami jėgos poveikį skirtingo dydžio medžiagos pavyzdžiams, mieliau vartoja įtempio ir santykinės deformacijos sąvokas, negu nustatinėja pailgėjimus veikiant skirtingoms jėgoms.

Įtempis atsiranda ne tik veikiant tempimui ir gniuždymui, bet ir šlyčiai bei sukimui. Kaip šiais atvejais įvertinti santykinę deformaciją, parodyta 5.24 pav.

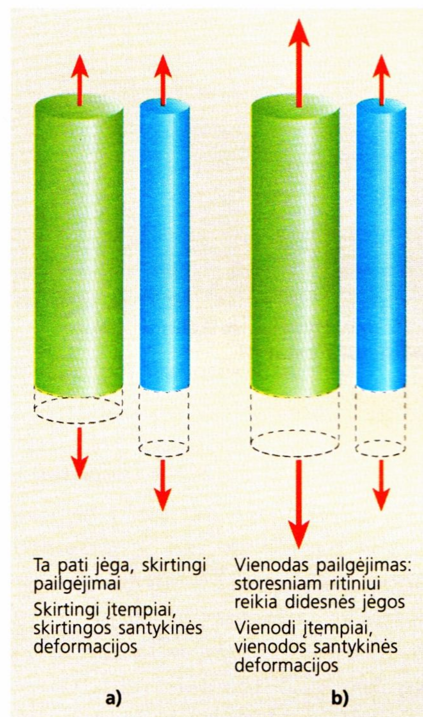
PAVYZDYS

K Vaikiškų sūpuoklių virvių ilgis 3 m. Atsisėdus vaikui ant sūpuoklių, virvės pailgėja 30 mm. Kokia yra virvių santykinė deformacija?

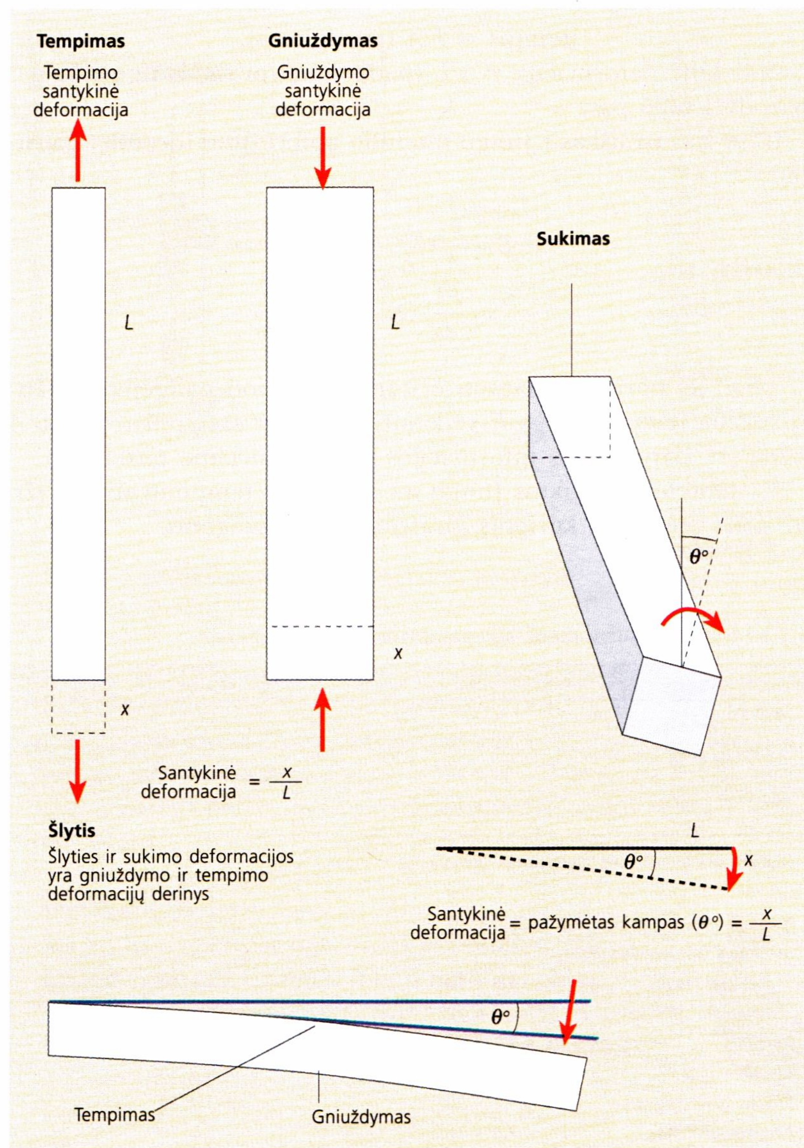
A

$$\text{Santykinė deformacija} = \frac{\text{pailgėjimas}}{\text{pradinis ilgis}} = \frac{x}{L}$$

$$= \frac{30 \times 10^{-3}}{3} = 0{,}01$$



5.23 pav. **Santykinė deformacija: nuo skerspjūvio ploto priklauso sąryšis tarp jėgos ir pailgėjimo**



5.24 pav. **Skirtingos santykinės deformacijos rūšys (visos aprašomos bedimensiais santykiais)**

Jungo modulis dar vadinamas tamprumo, arba elastiškumo, moduliu

Jungo (*Young*) modulis

Matėme, kad nedidelės jėgos veikiamai spyruoklei jėgos santykis su pailgėjimu yra pastovus dydis:

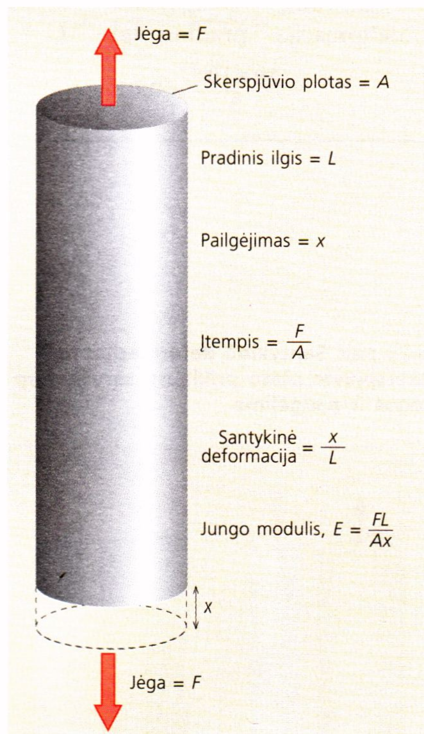
$$F/x = k$$

Daugeliui medžiagų galioja toks teiginys:

įtempio santykis su santykine deformacija yra konstanta.

Tai tolygu teiginiui, kad daugumai kietųjų kūnų, kaip ir spyruoklėms, galioja Huko dėsnis. Taigi inžinieriai gali numatyti, kokį poveikį tokioms medžiagoms sukels tempimo jėgos, nepriklausomai nuo to, kokios formos ir matmenų iš tos medžiagos pagaminti kūnai. Tempimo jėgos yra išilginės, ištempiančios ir pailginančios kūną. Šiuo atveju aptariamasis santykis yra vadinamas medžiagos **Jungo moduliu:**

$$\textbf{Jungo modulis } E = \frac{\textbf{tempimo įtempis}}{\textbf{tempimo santykinė deformacija}}$$



5.25 pav. **Dydžiai, reikalingi Jungo moduliui nustatyti**

Santykinė deformacija yra bedimensis dydis, todėl Jungo modulio matavimo vienetai sutampa su įtempio vienetais, būtent $N \cdot m^{-2}$.

Jau žinome, kad

įtempis = F/A (jėga/plotas),

o santykinė deformacija = x/L (pailgėjimas/pradinis ilgis), kaip parodyta 5.25 pav.

Įrašę šias išraiškas į Jungo modulio apibrėžimo formulę, gausime:

$$E = \frac{F}{A} \div \frac{x}{L}$$
$$= \frac{FL}{Ax} \ (\mathrm{N \cdot m^{-2}})$$

Žr. 3 ir 4 klausimus.

Taigi, jei norime išmatuoti E, turime matuoti pailgėjimą x, kurį sukelia tempimo jėga F, veikianti ilgio L ir skerspjūvio ploto A kūną (žr. papildomos informacijos sritį sekančiame puslapyje).

5.1 lentelėje pateiktos Jungo modulių E ir tempimo stiprių (žr. 97 psl.) vertės kai kurioms įprastinėms medžiagoms.

Žr. 7 klausimą.

5.1 lentelė. **Kai kurių medžiagų tamprumas ir atsparumas**

Medžiaga	Jungo modulis E ($N \cdot m^{-2}$)	Tempimo stipris ($N \cdot m^{-2}$)
Metalai		
Aliuminis	$7{,}0 \times 10^{10}$	7×10^{7}
Varis	11×10^{10}	$1{,}4 \times 10^{8}$
Tamprus plienas	21×10^{10}	$1{,}5 \times 10^{9}$
Statybinės ir buitinės medžiagos (apytikslės vertės)		
Guma	7×10^{6}	3×10^{7}
Plyta	7×10^{9}	5×10^{6}
Mediena (melsvosios eglės):		
išilgai rievių	$1{,}3 \times 10^{10}$	1×10^{8}
skersai rievėms	3×10^{6}	
Betonas	$1{,}7 \times 10^{10}$	4×10^{8}
Kaulas	$2{,}1 \times 10^{10}$	$1{,}4 \times 10^{8}$
Stiklas (pvz. lango)	7×10^{10}	$3–7 \times 10^{7}$
Anglies pluoštas	$7{,}5 \times 10^{11}$	2×10^{9}

?

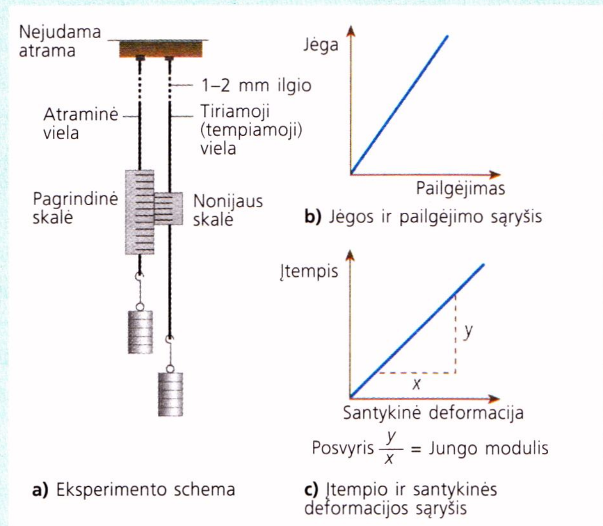
H Paaiškinkite, kodėl medienos stiprumas priklauso nuo krypties metinių rievių atžvilgiu.

Vielos Jungo modulio matavimas

Standartinis būdas vielos Jungo moduliui matuoti parodytas 5.26a) pav. Tiriamoji viela prikabinama prie lubų ir tempiama pakabinus jos kitame gale svarmenis.

Kadangi pailgėjimas yra mažas, jis paprastai matuojamas naudojant nonijaus skalę. Pagrindinė nonijaus skalė, dažniausiai sugraduota milimetrais, yra tvirtinama prie atraminės vielos. Pagalbinė skalė tvirtinama prie tiriamosios vielos.

Svarmenys kabinami po abiem vielomis, kad jos būtų įtemptos. Nustatoma nonijaus padėtis pagrindinės skalės atžvilgiu. Tada uždėti papildomi svarmenys veikia tiriamąją vielą papildoma jėga, ir nonijus pasislenka žemyn pagrindinės skalės atžvilgiu. Nustatoma nauja nonijaus padėtis ir apskaičiuojamas pailgėjimas. Žemyn veikianti jėga didinama uždedant naujus svarmenis, ir vėl matuojamas pailgėjimas.

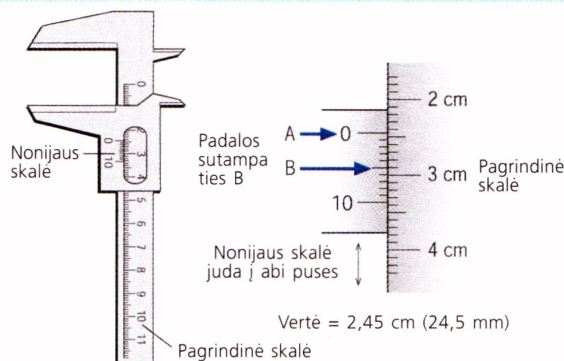


5.26 pav. **Eksperimentas Jungo moduliui nustatyti**

Jėgos sąryšio su pailgėjimu grafikas (5.26b) pav.) bus tiesinis, kol viela bus tamprumo srityje. Santykinę deformaciją (pailgėjimas/pradinis ilgis) galima apskaičiuoti išmatavus vielos ilgį eksperimento pradžioje.

Sraigtiniu mikrometru išmatuojamas vielos skersmuo ir apskaičiuojamas skerspjūvio plotas. Tada galima nubraižyti sąryšio tarp įtempio ir santykinės deformacijos grafiką (žr. 5.26c) pav.). Šis grafikas taip pat tiesinis. Iš jo polinkio galima tiesiogiai nustatyti vielos Jungo modulio vertę.

Kadangi atraminė viela yra pagaminta iš tos pačios medžiagos kaip ir tiriamoji, tai bet kokie temperatūros laboratorijoje svyravimai sukels vienodą abiejų vielų pailgėjimą ar sutrumpėjimą.



5.27 pav. **Atskaita nonijaus skalėje**

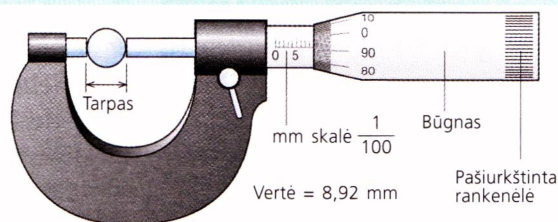
Kaip naudotis nonijaus skale

Nonijaus skalė (5.27 pav.) skirta mažiems ilgiams matuoti. Ją sudaro *dvi* skalės: rodmuo, kurį ant *pagrindinės skalės* atitinka *nonijaus* nulinė padala, rodo ilgį 1 mm tikslumu. Imama artimiausia milimetrinė padala į mažesniųjų verčių pusę. 5.27 paveiksle yra 2,4 cm (24 mm).

Nonijaus skalė padidina atskaitos tikslumą iki ±0,1 mm. Tikslią vertę rodo ta *nonijaus skalės* padala, kuri tiksliausiai atitinka bet kurią padalą pagrindinėje skalėje. Paveiksle su pagrindinės skalės padala geriausiai sutampa penktoji padala, pažymėta rodykle B. Taip gauname tikslią galutinę vertę 2,45 cm (24,5 mm). Jei nė viena iš padalų neatitinka visiškai tiksliai ir sutapimo padėtis yra tarp dviejų padalų, galima imti apytikslę vertę ±0,05 mm.

Kaip naudotis sraigtiniu mikrometru

Jis naudojamas tiksliam storio matavimui. Pagrindinėje skalėje, kaip ir nonijaus atveju, ilgį nustatome 1 mm tikslumu. Sraigtas šiame prietaise juda pasislinkdamas po 1 mm per vieną pilną apsisukimą, t. y. jo žingsnis 1 mm. Su sraigtu besisukantis būgnas yra sudalytas į 100 padalų, todėl nustatydami, kuri iš šių padalų sutampa su atskaitos linija, nubrėžta ant mikrometro korpuso, atskaitą atliekame 0,01 mm tikslumu. 5.28 pav. parodyta 8,92 mm vertė. Būkite atidūs: kai kurių sraigtinių mikrometrų žingsnis yra 0,5 mm, o būgnas padalytas į 50 padalų. Naudojant tokį mikrometrą, pagrindinėje skalėje reikia nustatyti matuojamą vertę 0,5 mm tikslumu.



5.28 pav. **Atskaita naudojant sraigtinį mikrometrą**

PAVYZDYS

K Lifto kabina pakabinta ant 2,5 cm skersmens plieninio lyno. Maksimalus lyno ilgis, kai liftas yra pirmame aukšte, lygus 36 m. Jungo modulis plienui yra lygus $2{,}1 \times 10^{11}$ N · m^{-2}. Kiek pailgės lynas, kai į pirmame aukšte esantį liftą įlips šeši žmonės, kurių bendra masė lygi 420 kg?

A Pirmiausia pasinaudosime Jungo modulio ir įtempio formulėmis:

$$\text{Jungo modulis} = \frac{\text{įtempis}}{\text{santykinė deformacija}} \qquad \text{įtempis} = \frac{\text{jėga}}{\text{plotas}}$$

Taigi: $$\text{santykinė deformacija} = \frac{\text{jėga}}{\text{plotas} \times E} = \frac{F}{AE}$$

Kadangi jėga = mg, santykinė deformacija = mg/AE,

kur m yra bendra tų šešių žmonių masė, o A – lyno skerspjūvio plotas.

Taikome santykinės deformacijos lygtį:

Pailgėjimas = pradinis ilgis × santykinė deformacija

= pradinis ilgis × mg/AE ($A = \pi r^2$)

$$= \frac{36 \times 420 \times 9{,}8}{\pi \times (1{,}25 \times 10^{-2})^2 \times 2{,}1 \times 10^{11}}$$

$$= 1{,}6 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

Lynas pailgės 1,6 mm.

?

1 Plieninės vielos skersmuo 0,57 mm, o ilgis 1,5 m. Kokia jėga reikia tempti šią vielą, kad ji pailgėtų 1,5 mm?

Verta atkreipti dėmesį į keletą su Jungo moduliu susijusių niuansų:

- Medžiagų, kurias sunku ištempti, Jungo modulis yra didelis. Net nedideliam efektui (deformacijai) sukelti reikia didelio įtempio.
- 5.1 lentelėje pateiktos E vertės gali būti taikomos tik tuo atveju, kai *vidinė kūno struktūra* deformacijos metu išlieka visiškai nepakitusi (žr. toliau).
- Medžiagos Jungo modulis yra pastovus tik ribotame deformacijos ruože, kol tai medžiagai galioja Huko dėsnis: pailgėjimas yra proporcingas veikiančiai jėgai.

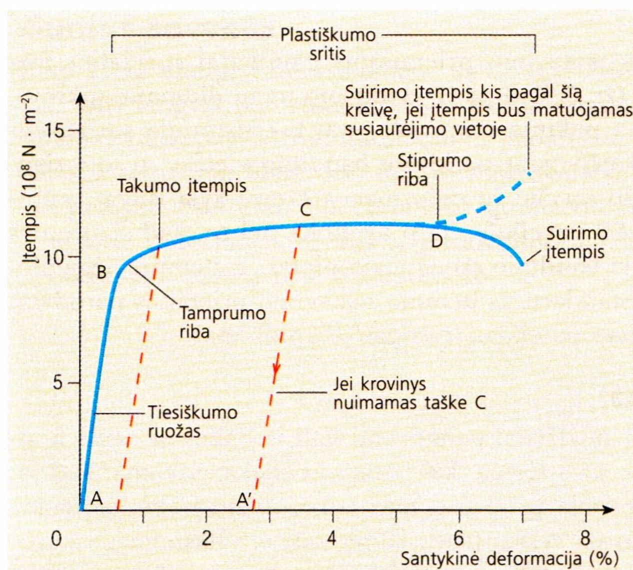
Įtempio ir santykinės deformacijos sąryšio kreivės

Daugeliui medžiagų Huko dėsnis galioja tik esant mažoms apkrovoms. Taigi skirtingų medžiagų įtempio ir santykinės deformacijos sąryšio kreivės yra skirtingos. Keičiant plieno sudėtį, ypač anglies priemaišų kiekį, gaminamos plieno rūšys su labai skirtingomis savybėmis. 5.29 ir 5.30 paveiksluose pavaizduotos įtempio ir santykinės deformacijos sąryšio kreivės dviems labai skirtingiems plienams.

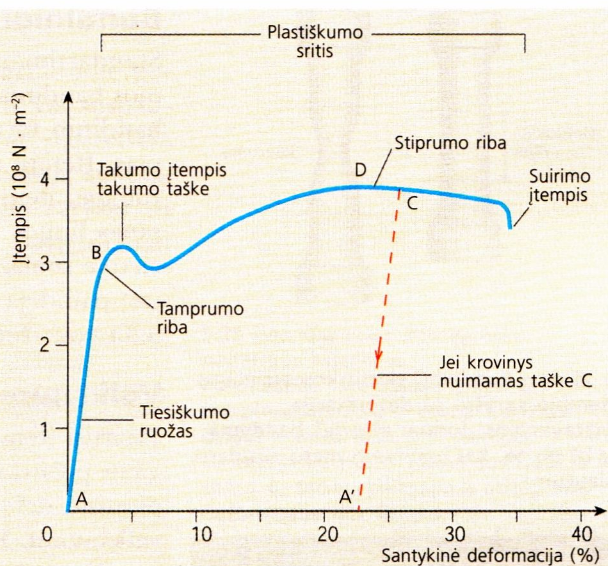
5.29 ir 5.30 paveiksluose pateiktos plieninių vielų charakteristikos turi tiesines dalis AB, kur santykinė deformacija proporcinga įtempiui. Nuėmus kurios nors iš šių vielų apkrovą, vielos ilgis grįžta charakteristikos dalimi BA prie pradinės vertės A.

Už taško B jėga, kurios reikia, kad būtų ištemptas bet kokios rūšies plienas, jau netiesiškai priklauso nuo pailgėjimo. Šioje srityje vielos pailgėjimas veikiant tai pačiai jėgai yra didesnis nei būtų tiesinėje priklausomybės dalyje. Be to, pašalinus apkrovą, tarkime, taške C, vielos pailgėjimas (tuo pačiu ir santykinė deformacija) išlieka tam tikros didesnės už nulį vertės taškas A′.

Kadangi plieninė viela nėra visiškai tampri, pailgėjimas išlieka. Grafikuose galime matyti, kas įvyksta nuėmus prie vielų prika-



5.29 pav. **Pirmosios vielos įtempio sąryšio su santykine deformacija kreivė**



5.30 pav. **Antrosios vielos įtempio sąryšio su deformacija kreivė**

bintus svarmenis. Įtempio sąryšio su santykine deformacija kreivė eina atšakomis CA′. Ši atkarpa yra lygiagreti pradinei atkarpai, atitinkančiai tamprumo sritį BA. Kai medžiagos ilgis, pašalinus krovinį, nebegrįžta iki pradinės vertės, sakoma, kad vyksta **plastinė deformacija.**

?

J Viengysle plieninė viela (jos charakteristika pateikta 5.29 pav.) keliama 50 kg masės platforma su **a)** moterimi ir **b)** drambliu. Tarkime, saugumo sumetimais įtempis toje plieninėje vieloje neturėtų viršyti 10% plieno stiprumo ribos. Apskaičiuokite, kokio minimalaus skersmens vielos prireiks abiem atvejais. (Sakykime, kad moters masė lygi 55 kg, o dramblio 4000 kg.)

Takumo taškas

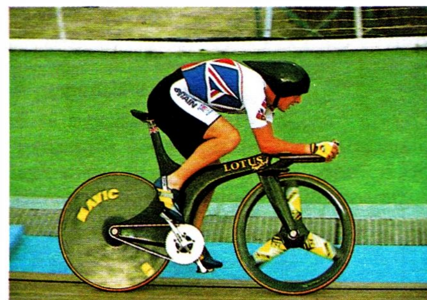
5.29 ir 5.30 paveiksluose pateiktos įtempio ir santykinės deformacijos sąryšio kreivės virš tamprumo ribos pakrypsta skirtingai. 5.30 paveikslo kreivėje yra smailės taškas, virš kurio įtempis (jėga, kurios reikia tolesniam tempimui) sparčiai mažėja. Šis taškas vadinamas **takumo tašku,** o jį atitinkantis įtempis – **takumo įtempiu.**

Pirmoji plieninė viela irgi yra taki, tačiau ryškaus takumo taško čia nepastebime. Šiuo atveju imame tašką plastinės deformacijos ruože, kurį patys pasirenkame. Paprastai imama 0,5% vertė, t. y. tokia vertė, kad atkarpa AA′ būtų lygi 0,5%. Grafike 5.29 nuo vertės 0,5% brėžiame į viršų liniją, lygiagrečią atkarpai AB, ir jos sankirtos su kreive taškas atitiks takumo įtempį, pažymėtą grafike.

Tamprumo riba tempimui

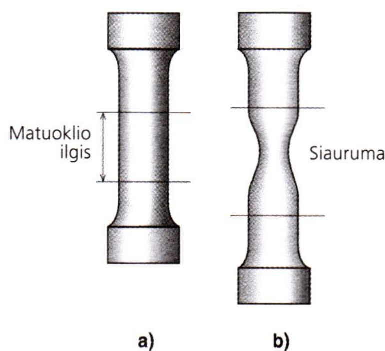
Abiem bandiniams egzistuoja tam tikras jiems būdingas maksimalus įtempis. Šis maksimalus įtempis yra vadinamas **tamprumo riba.** Tolesniam tempimui reikalinga mažesnė jėga. Jei tiesiog paliksime tą patį krovinį, bandinys ir toliau ilgės, kol pagaliau nutrūks. Labai svarbu žinoti apie tokios avarijos galimybę projektuojant stambias konstrukcijas.

Plieno tamprumo riba yra itin svarbi, nes plienas labai plačiai taikomas statybose. Tačiau atkreipkite dėmesį į 5.1 lentelėje pateiktą vertę kaului. Ji 10 kartų mažesnė nei plienui, tačiau didesnė už stiprumo vertę daugeliui kitų medžiagų. Žmonių ir kitų gyvūnų skeletai pasižymi puikiai suderintomis savybėmis – lengvumu ir gebėjimu atlaikyti įtempius, atsirandančius dėl kūno svorio ir jam judant. Taip pat pažymėtina, kad vertė anglies pluoštui yra ypač didelė. Todėl iš jo gaminamos raketės, meškerykočiai ir aukštos klasės dviračiai.



5.31 pav. **1992 metų Olimpinių žaidynių aukso medalio laimėtojas Chrisas Boardmanas važiuoja *Team Lotus* lenktyniniu dviračiu**

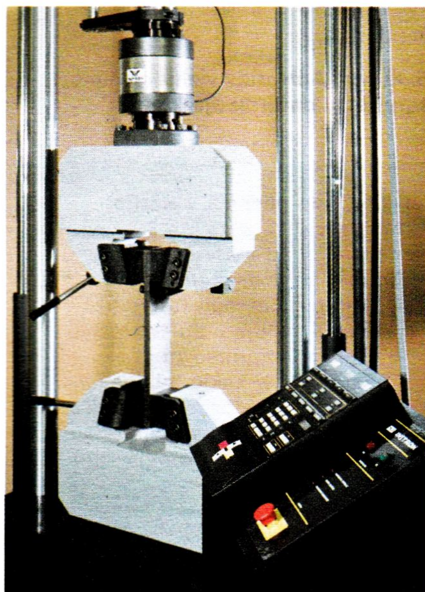
■ Žr. 5 ir 7 klausimus.



5.32 pav. **Bandinių, skirtų komerciniams įtempio sąryšio su deformacija matavimams, forma:** a) **prieš bandymą ir** b) **po to, kai bandymo metu susidaro siauruma**

Bandiniai

Standartiniams matavimo prietaisams gaminami specialios formos bandiniai (žr. 5.32a) pav.). Bandymo metu didinant apkrovą, bandinio forma pakinta (žr. 5.32b) pav.) – atsiranda susiaurėjimas. Įtempį skaičiuojant ne kitose bandinio vietose, o toje siaurumoje, įtempio sąryšio su deformacija kreivė kyla išilgai brūkšninės linijos 5.29 paveiksle. Taip atsitinka dėl to, kad siaurumos vietoje sumažėja bandinio skerspjūvio plotas, ir įtempis (jėga/plotas) padidėja. Standartinis įtempio matavimo prietaisas parodytas 5.33 pav.; žemiau pateiktas trumpas jo aprašymas.



5.33 pav. **Servohidraulinis įtaisas, skirtas matuoti metalinio bandinio įtempiui.**
Tokie standartiniams matavimams skirti prietaisai tempia bandinius kintamo dydžio jėga. Prietaisas iš karto nustato jėgos padidėjimą ar sumažėjimą kintant ilgiui. Tokiu būdu šis prietaisas gali išmatuoti ir tas 5.29 pav. **pavaizduotos kreivės dalis, kuriose įtempis mažėja**

Žr. 8 ir 9 klausimus.

Valkšnumas

Patyrusi įtempį medžiaga palaipsniui gali iš dalies ar visiškai atgauti pirmykštę savo formą, kai įtempio nelieka. Sakoma, kad jos plastinė deformacija priklauso nuo laiko, ir ši savybė vadinama **valkšnumu.** Kai tai vyksta plastiškumo srityje, valkšnumas vadinamas **klampiuoju plastiškumu.** Kai kuriais atvejais valkšnumas būdingas tamprumo ruože, ir po kurio laiko buvusi forma visiškai atsistato. Ši valkšnumo rūšis vadinama **klampiuoju elastiškumu.**

PAVYZDYS

K Lynas susuktas iš 100 didelio tamprumo plieninės vielos 1 mm skersmens vijų. Įtempis lyne turi būti ne didesnis kaip 1/5 suirimo įtempio. Kokį maksimalų krovinį galima kabinti ant šio lyno?

Suirimo įtempis 0,1%. Jungo modulis $2{,}1 \times 10^{11}\ \mathrm{N \cdot m^{-2}}$.

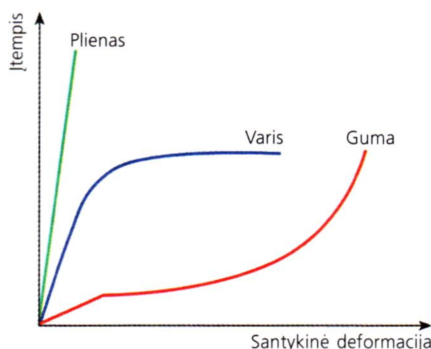
A

$$\text{Bendras lyno skerspjūvio plotas} = 100 \times \text{vienos pavijos skerspjūvio plotas}$$
$$= 100 \times \pi \times (0{,}5 \times 10^{-3})^2\ \mathrm{m^2}$$
$$= 7{,}85 \times 10^{-5}\ \mathrm{m^2}$$

Pagal apibrėžimą: $\text{Įtempis} = E \times \text{santykinė deformacija}$

$$\text{Suirimo įtempis} = 10^{-3}\ (\text{t. y. } 0{,}1\%)$$
$$\text{Maksimalus leistinas įtempis} = E \times (0{,}2 \times \text{suirimo įtempis})$$
$$= 2{,}1 \times 10^{11} \times 0{,}2 \times 10^{-3}\ \mathrm{N \cdot m^{-2}}$$
$$= 4{,}2 \times 10^{7}\ \mathrm{N \cdot m^{-2}}$$
$$\text{Maksimali apkrova} = \text{įtempis} \times \text{plotas}$$
$$= 4{,}2 \times 10^{7} \times 7{,}85 \times 10^{-5}\ \mathrm{N}$$
$$= 3{,}3 \times 10^{3}\ \mathrm{N}$$

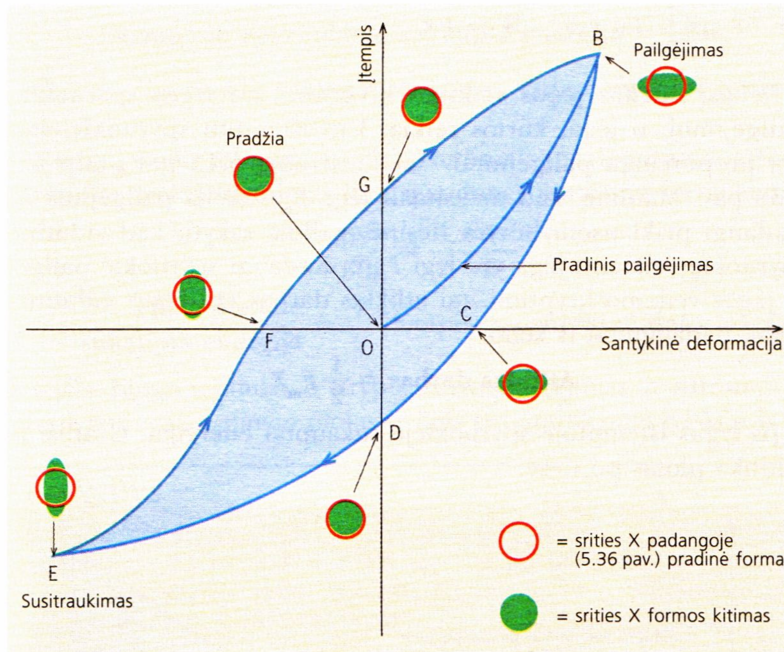
5.34 paveiksle atvaizduoti įtempio ir deformacijos sąryšiai plienui, variui ir gumai. Nors mastelio nesilaikyta, galima palyginti jų santykines deformacijas. Varį ištempti yra lengviau nei plieną, ir grafike atsispindi, kad jo tamprumo riba jau viršyta. Plieno plastiškumo ruožas grafike dar nepasiektas. Gumą iš pradžių labai nesunku ištempti, tačiau pasiekti didesnį pailgėjimą darosi vis sunkiau ir sunkiau. Pašalinus krovinį, jos ilgis atsistato. Ilgalaikės deformacijos nelieka, todėl guma irgi yra tampri. Kai kurios medžiagos nėra plastiškos. Sakoma, kad jos yra **trapios.** Trapių medžiagų pavyzdžiai – stiklas ir betonas.



5.34 pav. **Įtempio sąryšio su santykine deformacija kreivės plienui, variui ir gumai (nesilaikant mastelio)**

Gumos savybės

Kaip kinta energija deformuojant medžiagą? Panagrinėsime gumą, kuri lengvai deformuojasi. Kai ji ištempiama ir vėl suspaudžiama, kaip, pavyzdžiui, automobilių padangos, joje pasireiškia tai, kas vadinama **histereze:** deformacija atsilieka nuo ją sukėlusio įtempio. Automobilio padangos gumos įtempio sąryšio su santykine deformacija grafikas pavaizduotas 5.35 pav. Įdėmiai perskaitykite parašą prie šio paveikslo.

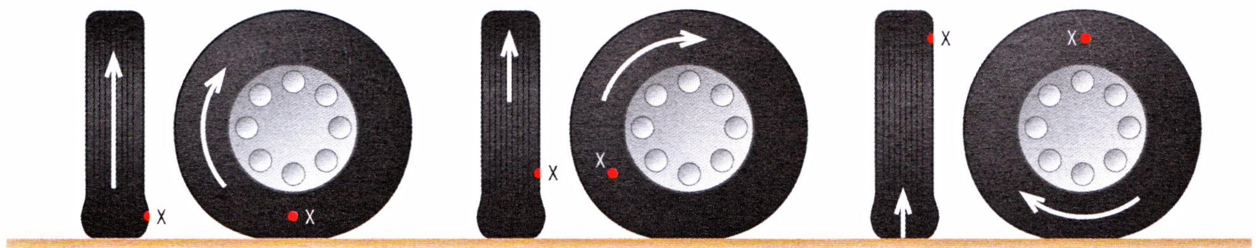


5.35 pav. **Guminės automobilio padangos histerezė. Po pradinio ištempimo išilgai OB tempimas mažėja ir guma traukiasi išilgai kreivės BCD. Kai įtempis sumažėja iki nulio, guma susitraukia iki taško C, tačiau pailgėjimą atitinkanti deformacija dar išlieka. Guma susitraukia iki pradinio ilgio tik tada, kai ją paveikia gniuždantis įtempis OD. Toliau gniuždant įtempties sąryšį ir su santykine deformacija pasiekia tašką E. Po to gniuždymas palaipsniui mažinamas, ir gumai ilgėjant praeinama atkarpa EFGB. Procesas kartojasi. Nutrūkus cikliniam procesui guminis kūnas atgauna pradinę formą.**

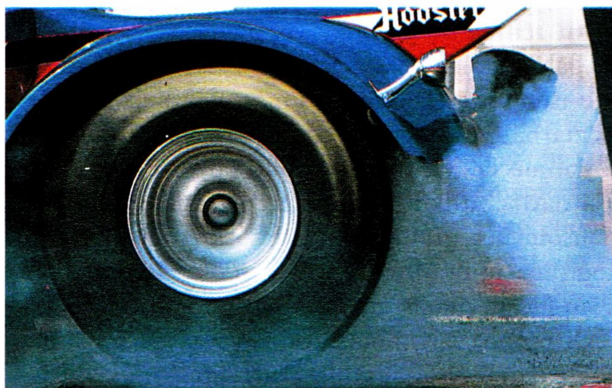
Kreivė akivaizdžiai rodo, kad histerezės procese gumos deformacija atsilieka nuo įtempio pokyčio. Įtempio sąryšio su santykine deformacija grafike nuspalvintos srities plotas atitinka gumoje atliktą darbą. Atlikus šį darbą gumoje išsiskiria šiluma.

?

K Išnagrinėkite 5.35 pav. grafiką. Naudodamiesi šiuo grafiku aprašykite trajektoriją, kurią diagramoje praeina taškas, atitinkantis 5.36 pav. parodytoje padangoje sritį X, kai ji apsisuka pusę apsisukimo.



5.36 pav. **Taško X automobilio padangos šone deformacija, padangai apsisukus pusę apskritimo. Atkreipkite dėmesį į šios padangos dalies formos kitimą**



5.37 pav. **Nuolat deformuojantis šiai lenktyninio automobilio padangai išsiskiria didelis šilumos kiekis**

4 ENERGIJA, SUKAUPTA IŠTEMPTOJE TAMPRIOJE MEDŽIAGOJE

Deformuojanti kūną jėga atlieka darbą. Taigi medžiagai perduodama energija. Kol deformacija išlieka, sakome, kad ta energija yra „sukaupta“ medžiagoje. Paprasčiausiu ištemptos spyruoklės atveju:

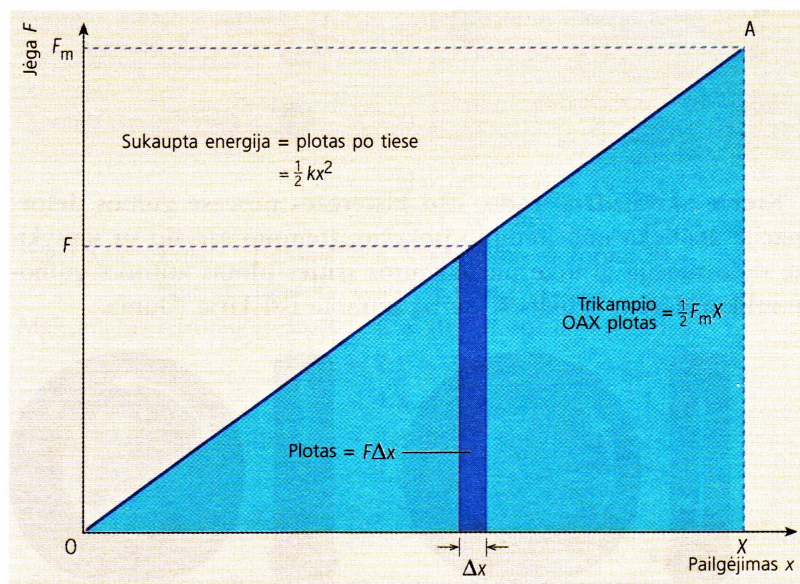
Atliktas darbas = jėga × kelias, nueitas jėgos veikimo kryptimi

(žr. 58 psl.). Tai yra: $W = Fd$

Kelias, nueitas jėgos veikimo kryptimi, yra lygus spyruoklės pailgėjimui, o jėga, kurios reikia, kad ištemptų spyruoklę, irgi yra proporcinga pailgėjimui. Tai iliustruoja 5.13 pav., taip pat 5.38 pav. Matome, kad maksimali jėga F_m sukelia pailgėjimą X. Kadangi priklausomybė yra tiesinė, galime sakyti, kad vidutinė spyruoklę veikianti jėga yra lygi $F_m/2$. Kadangi spyruoklė pailgėja jėgos veikimo kryptimi, tai atliktas darbas yra lygus vidutinei jėgai, padaugintai iš kelio:

$$\textbf{Atliktas darbas} = \frac{1}{2} F_m X$$

Jis lygus ištemptoje spyruoklėje sukauptai energijai. Grafike ją atitinka plotas po tiese.



5.38 pav. **Ištemptoje spyruoklėje sukauptos energijos skaičiavimas**

Sukauptą energiją galima apskaičiuoti ir kitu būdu, nagrinėjant mažą spyruoklės pailgėjimą Δx (vėl žr. 5.38 pav.). Jei pailgėjimas labai mažas, jėga pakinta labai menkai: galime imti jos vidutinę vertę F. Spyruoklę ištempus šį mažą atstumą Δx, atliekamas darbas $F\Delta x$. Atliktas darbas atitinka paryškintos juostos plotą. Šią juostą apytiksliai galime laikyti stačiakampiu, kurio plotas $F\Delta x$.

Norint rasti visą darbą, atliktą ištempiant spyruoklę, visą plotą po tiesinės priklausomybės grafiku reikėtų suskirstyti juostomis, pradedant nuo koordinačių pradžios, kur $F = 0$, iki taško, kuriame $F = F_m$. Bendras šių juostų plotas prilygsta trikampio po tiese plotui (trikampio OAX plotui). Šis plotas atitinka visą darbą, atliktą ištempiant spyruoklę, kur X yra galutinis pailgėjimas veikiant F_m.

Žr. 6 klausimą.

$$\text{Atliktas darbas} = \frac{1}{2} F_m X$$

Gavome tokią pat vertę, kaip ir pirmuoju būdu. Kartais sakoma, kad suspaudžiant spyruoklę atliekamas darbas, ir joje susikaupia **tamprumo potencinė energija.**

Taigi $F_m = kX$, kur k yra spyruoklės tamprumo konstanta. Įrašę šią F_m išraišką į aukščiau pateiktą formulę, nagrinėdami bet kokį pailgėjimą x (ne tik maksimalų pailgėjimą X, atitinkantį jėgą F_m), spyruoklėje sukauptą energiją galime išreikšti taip:

$$\textbf{Ištemptoje spyruoklėje sukaupta energija} = \frac{1}{2} k x^2$$

Žinoma, spyruoklę galima ir suspausti, tada x reikš jos sutrumpėjimą.

Kietųjų kūnų tempimas ir suspaudimas aprašomi analogiškai. Strypo ar vielos tempimas ir suspaudimas aprašomi formulėmis:

$$\textbf{Sukaupta energija} = \frac{1}{2}\frac{EAx^2}{L}$$

ir:

$$\textbf{Tūrio vienete sukaupta energija} = \frac{1}{2}\,\textbf{įtempis} \times \textbf{santykinė deformacija,}$$

kur E – Jungo modulis, o strypo, kurio pailgėjimas ar sutrumpėjimas lygus x, skerspjūvio plotas ir ilgis yra atitinkamai lygūs A ir L.

■ 9 klausimas šio skyriaus gale padės jums išvesti šiuos sąryšius.

PAVYZDYS

K Betoninės kolonos laiko pastato viršutinį aukštą. Kolonos yra 2,5 m aukščio ir 200 mm skersmens kiekviena. Pastačius viršutinį aukštą, kiekvienai kolonai tenka 8×10^4 N apkrova.

a) Kiek sutrumpėja kolonos veikiant šiai apkrovai?

b) Koks energijos kiekis yra sukauptas kiekvienoje kolonoje dėl šio suspaudimo?

Tvirto betono $E = 4 \times 10^{10}\ \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$.

A

a) Santykinė deformacija = x/L = įtempis/E

$$\text{Sutrumpėjimas } x = \frac{\text{įtempis} \times L}{E} = \frac{(\text{apkrova/plotas}) \times L}{E}$$

$$= \frac{8{,}0 \times 10^4 \times 2{,}5}{4 \times 10^{10} \times \pi \times (0{,}1)^2}\ \text{m} = 1{,}6 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

b) Sukaupta energija = vidutinė jėga × sutrumpėjimas

$$= \frac{1}{2}(8 \times 10^4) \times (1{,}6 \times 10^{-4})\ \text{J} = 6{,}4\ \text{J}$$

Taip skaičiuoti lengviau nei naudojantis formule

$$\text{Sukaupta energija} = \frac{1}{2} EAx^2/L$$

$$= \frac{1}{2}\frac{4 \times 10^{10} \times \pi \times (0{,}1)^2 \times (1{,}6 \times 10^{-4})^2}{2{,}5}\ \text{J}$$

$$= 6{,}4\ \text{J}$$

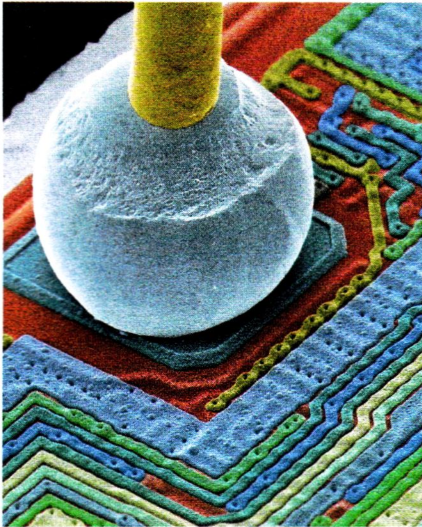
5 MEDŽIAGŲ MIKROSTRUKTŪROS SĄRYŠIS SU JŲ SAVYBĖMIS

Pagalvokite apie įprastus aplinkos kūnus. Pavyzdžiui, virtuvėje naudojamės varine keptuve ir stiklinėmis taurėmis. Jų savybės labai skirtingos; tuo nesunku įsitikinti abu šiuos daiktus numetus ant grindų.

Kasdieninės medžiagos gali būti ir gryni cheminiai junginiai, ir sudėtingi cheminių junginių mišiniai. Varis yra cheminis elementas – metalas. Į stiklo sudėtį įeina keletas cheminių junginių, daugiausiai silicio dioksido. Tokios *gamtinės* medžiagos, kaip mediena, oda ar uolienos, yra dar sudėtingesnės. *Dirbtinės* medžiagos

ar perdirbtos gamtinės medžiagos dažniausiai yra sudėtinės, pavyzdžiui, plytos, guma, metalų lydiniai, mišrūs pluoštai (poliesteris su medvilne), kartonas.

Kompozitai yra labai naudingi, nes jie įgyja savybių, būdingų dviem ar net kelioms medžiagoms. Gelžbetonis, stiklo plastikas, anglies pluoštas ir fanera – tai tik keletas dažnai sutinkamų kompozicinių medžiagų pavyzdžių.



5.39 pav. **Jungties kontakto su silicio lustu vaizdas, gautas skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, kurio didinimas × 383 (spalvos iškraipytos)**

Nuo ko priklauso konkrečios medžiagos savybės? Norint atsakyti į šį klausimą, reikia panagrinėti keletą veiksnių, pirmiausia:

- jėgas tarp atomų – cheminius ryšius,
- atomų išsidėstymą – ar jie susijungę į molekules, ar sudaro sudėtinį vientisą darinį,
- molekulių pobūdį (jei medžiaga molekulinė) – ar jos yra ilgos ir ar ryšiai tarp jų yra stiprūs, kaip gumoje ar plastike, ar mažos ir su silpnais tarpusavio ryšiais, kaip esti tarp grafitą sudarančių atominių sluoksnių,
- mikrostruktūrą (struktūrą labai smulkiame ilgių mastelyje) – ar ji šiame mastelyje yra vienalytė, ar ne, ar yra įtrūkimų ir defektų,
- makrostruktūrą (struktūrą stambiu masteliu) – ar tai monokristalas, polikristalas, pluoštinė medžiaga ar kompozitas.

Kai kalbame apie mikroskopinę struktūrą, tai turime galvoje struktūrą, kurią galime įžiūrėti naudodamiesi optiniu ar elektroniniu mikroskopu (5.39 pav.). Makroskopinę struktūrą galime įžiūrėti plika akimi arba pro lupą.

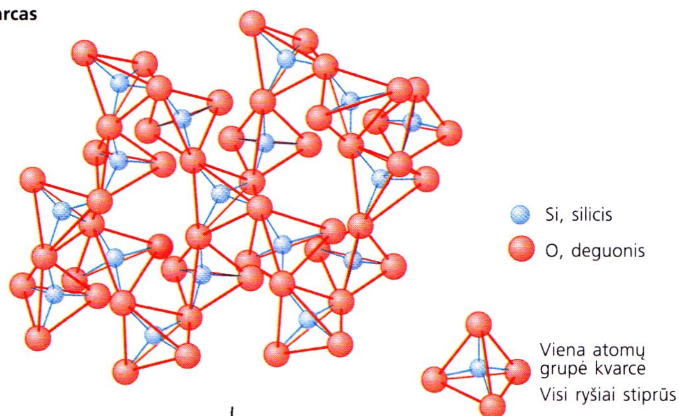
Kietųjų kūnų ryšius sudaro elektrinės kilmės jėgos. Jos atsiranda dėl krūvių, kuriuos turi elementariosios medžiagos dalelės – **elektronai** ir **protonai.** Gryną cheminį junginį sudaro arba vienos rūšies atomai (tada turime cheminį *elementą*), arba skirtingų rūšių atomai, susijungę į vienos rūšies molekules, kurios ir sudaro tą cheminį *junginį*. Mechaninės medžiagų savybės, tokios kaip tankis, tamprumas, stiprumas, priklauso nuo to, iš kokios rūšies atomų tos medžiagos sudarytos ir kaip tie atomai tarpusavyje surišti. Atomų molekulėje jėgos (vadinamieji ryšiai) dažniausiai yra stipresnės nei molekules kietajame kūne rišančios jėgos. Apie atominius ryšius daugiau sužinosite 7 skyriuje.

Molekulės ir jų dariniai

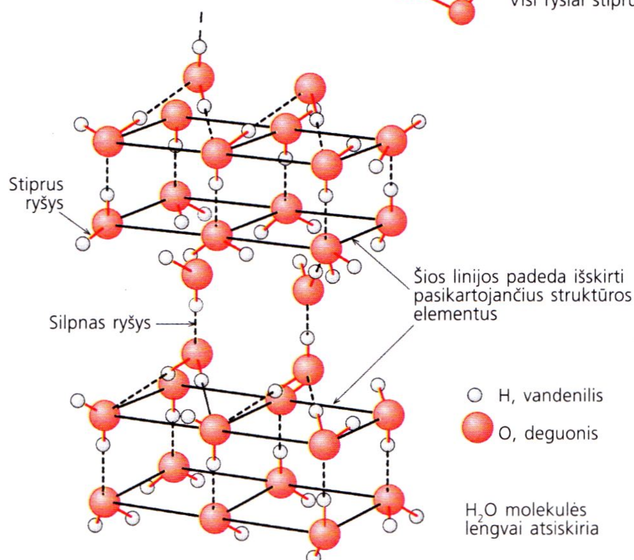
Ne visuose cheminiuose junginiuose atomai sudaro molekules. Chemikai žodžiu **molekulė** vadina tokį atomų darinį, kuris gali egzistuoti ir judėti kaip visuma, ypač kai medžiaga yra skystos arba dujinės būsenos. Pavyzdžiui, egzistuoja vandens, deguonies, anglies dioksido, jodo molekulės. Šioms medžiagoms sukietėjus, jėgos tarp molekulių yra silpnos, todėl tokie kietieji kūnai irgi yra silpni. Kambario temperatūroje jie esti skysčio arba dujų pavidalo, kadangi tarp molekulių veikiančios jėgos yra silpnos, ir molekulės lengvai atitrūksta viena nuo kitos.

Kai kuriose kitose medžiagose jėgos, rišančios molekules, yra beveik tokios pat stiprios kaip ir jėgos, rišančios atomus molekulėje. Pavyzdžiui, silicio dioksido (SiO_2) molekulės surištos tokiu būdu, kad neįmanoma pasakyti, kur baigiasi viena molekulė ir prasideda kita. Dėl to susidaro labai tvirtas junginio darinys, **molekulinė makrosistema.**

Žr. 10 ir 14 klausimus.



5.40a) pav. **Kvarco – silicio dioksido atmainos – turinčios molekulinę gardelę, struktūra. Kiekvieną silicio atomą supa keturi deguonies atomai, sudarantys apie jį tetraedrą**



5.40b) pav. **Ledo struktūra, kuriai būdingas silpnas ryšys tarp molekulių**

Silicio dioksidas su priemaišomis, smėlis (svarbi statybinė medžiaga) atsiranda iš sudūlėjusių uolienų. Silicio dioksidas yra kietas ir tvirtas, todėl išlieka, kai kiti uolienas sudarantys komponentai išpustomi ir virsta smulkiomis dalelytėmis. 5.40 paveiksle pavaizduotos kristalinės silicio dioksido formos, kvarco, struktūrą galima palyginti su ledo, kuriam būdingas silpnas ryšys tarp vandenilio atomų, struktūra. Vandenilio ryšiai gali lengvai nutrūkti. Taip atskyla pavienės vandens molekulės (H_2O).

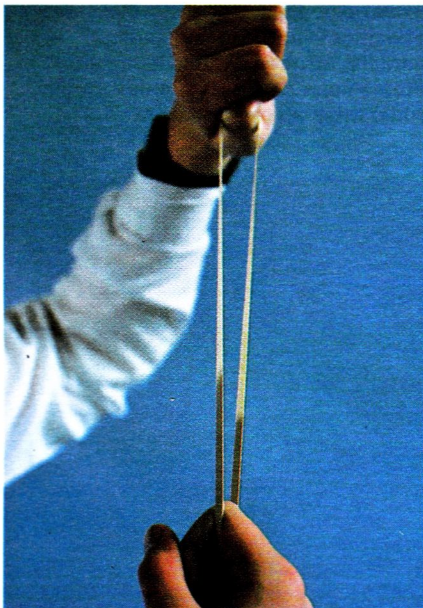
■ Žr. 15 klausimą.

Natrio chloridas – valgomoji druska – **joninės gardelės** pavyzdys. Druskos – dažnai pasitaikantys metalų ir rūgščių radikalų junginiai (pavyzdžiui, metalų chloridai, nitratai ir karbonatai). Čia struktūriniai elementai yra **jonai** – t. y. atomai ar atomų grupės, praradę ar gavę **elektronus.** Jonai gali egzistuoti atskirai vandeniniame tirpale (medžiagai ištirpus vandenyje). Kietuosiuose kūnuose jie sudaro gardelę, kurioje dalelių ryšius užtikrina elektrinės jėgos tarp priešingą krūvį turinčių jonų. Daugelis žinomų kristalų, pavyzdžiui, vario sulfatas, kurį galite pamatyti chemijos laboratorijoje, yra sudaryti iš jonų.

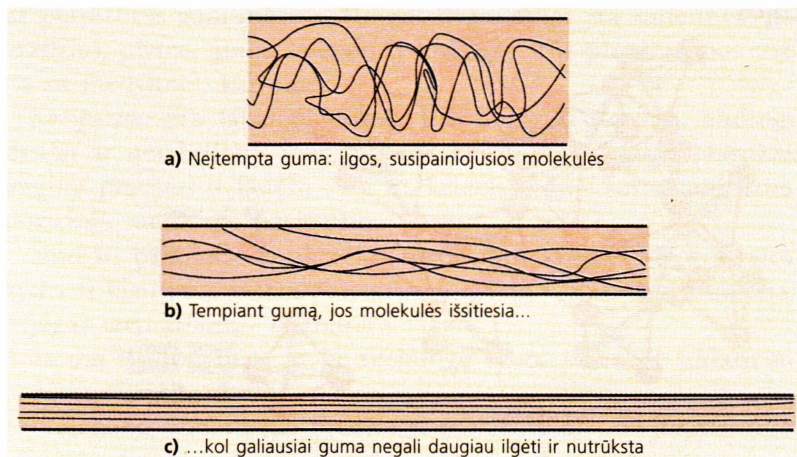
Dauguma joninę gardelę turinčių medžiagų yra silpnos ir trapios. Kitos yra tvirtos, bet trapios, pavyzdžiui, kalcio karbonatas. Kalkakmenio pavidalu jis paplitęs kaip dažnai naudojama statybinė medžiaga. Statyboje naudojamų joninių medžiagų trūkumas – jos nors ir lėtai, bet tirpsta vandenyje ir yra neatsparios rūgščių poveikiui (5.41 pav.).



5.41 pav. **Gerokai apardyta kalkakmenio arkada. (Sritis viršutinėje kairiojoje dalyje restauruota)**



5.42 pav. **Gumos savybes nulemia jos molekulių išsidėstymas**



Guma yra gamtoje sutinkamas polimeras, sudarytas iš molekulių, susijungusių į ilgas grandines. Normalioje būsenoje tos molekulės yra išsidraikiusios, susipainiojusios tarpusavyje (žr. 5.42 pav.), o tarp jų veikiančios jėgos silpnos. Kaip parodyta 5.42b) pav., ištempus guminę juostelę, gumos molekulės išsitiesia, todėl juostelė pailgėja. Pagaliau, kaip pavaizduota 5.42c) pav., molekulės visiškai išsitiesia ir išsidėsto beveik lygiagrečiai viena kitai. Tuo metu juostelės ilgis gali iki 10 kartų būti didesnis už pradinį jos ilgį. Dar didesnė jėga juostelę suplėšytų. Jei guma neištempiama iki plyšimo ir jėga nustoja veikti, tai tarpmolekulinių ryšių veikiamos molekulės stengiasi vėl susisukti atgal. Jei ryšiai tarp molekulių nebuvo pažeisti, susitraukimas bus tamprus.

Metalų struktūra ir savybės

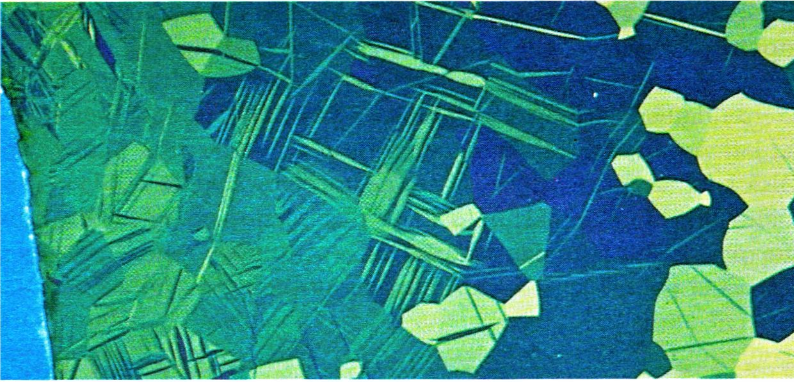
Kiekvienas metalo atomas turi vieną ar kelis išorinius elektronus, kurie gali laisvai judėti tarp atomų. Galime įsivaizduoti, kad šie elektronai sudaro neigiamo krūvio „jūrą", kuri juda tarp tvarkingai išsidėsčiusių teigiamų metalo jonų sferų, sudarančių gardelę. Metalai yra geri elektros laidininkai kaip tik dėl to, kad šie elektronai yra tokie judrūs.

Traukos tarp jonų ir laisvųjų elektronų jėga ir sukuria „metalinį" ryšį. Stabiliausias išsidėstymas būna tada, kai atomai užima mažiausią tūrį ir jų sluoksniai sudaro tankiosios sanglaudos heksagoninę periodinę seką. Šis išsidėstymas ir sudaro tvarkią kristalinę metalų struktūrą.

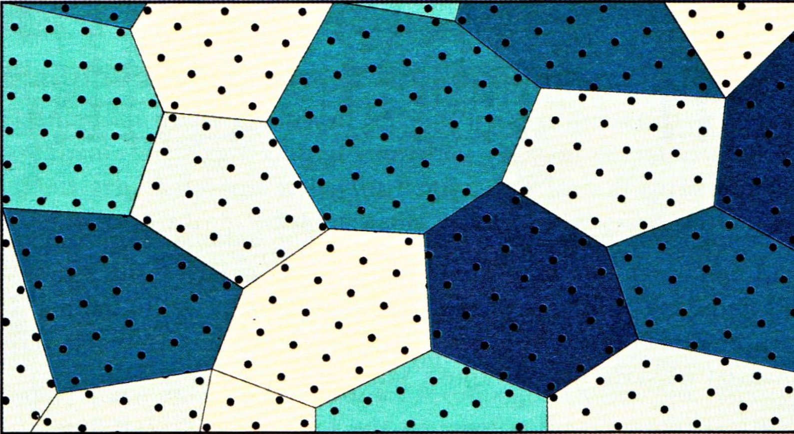
Tarp metalo jonų „sferų" nėra *kryptingų* ryšių, kurie galėtų fiksuoti gretimus atomus. Dėl to atomus nesunku priversti judėti į naują padėtį, nors ryšiai (traukos jėgos) tarp atomų ir stiprūs. Būtent todėl dauguma metalų yra ne tik stiprūs, bet ir lankstūs. Metalus galima iškalti ir išploti, nes jie yra **kalūs,** bei ištempti iš jų vielą, nes jie yra **tąsūs.**

Kietėjant išlydytam metalui, kristalinė struktūra paprastai pradeda formuotis (susidaro jos užuomazgos) daugelyje skirtingų vietų. Tai reiškia, kad susiformuoja daug mažų kristalų ar **grūdelių** (dažnai vadinamų kristalitais), kurie ir sudaro kietos būsenos metalą. Šie kristalitai susipakuoja taip, kad netaisyklingos **kristalitų sienelės** orientuojamos įvairiomis kryptimis. Sakoma, kad tokia medžiaga yra polikristalinė (5.43 ir 5.44 pav.). Kaip pamatysime vėliau, kristalitų dydžiai ir sienelių savybės nulemia metalo mechanines savybes.

Žr. 15 klausimą. ■



5.43 pav. **Polikristalinis titano lydinys. Matomi grūdeliai (kristalitai) ir jų sienelės. Vaizdas gautas poliarizuotoje šviesoje, todėl mikroskopinėje nuotraukoje akivaizdi atomų orientacija**



5.44 pav. **Polikristalinis metalas. Pavaizduota, kad kiekvieno mikrokristalito ribose atomai sudaro tokią pačią kristalinę gardelę, tačiau gretimuose kristalituose tos gardelės yra skirtingai orientuotos**

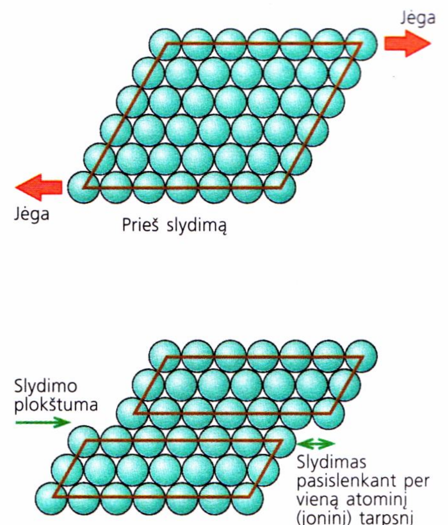
Kas atsitinka ištempus metalą

Kai metalą veikia apkrova, jo atomai (griežtai kalbant, metalo jonai) šiek tiek pasislenka vienas kito atžvilgiu. Ryšius tarp atomų įsivaizduokite kaip spyruoklių tinklą. Šių spyruoklių pailgėjimas – atstumas, kuriuo pasislinko atomai, – yra proporcingas apkrovai. Kai apkrova pašalinama, atomai grįžta į pradinę būseną. Metalui galioja Huko dėsnis.

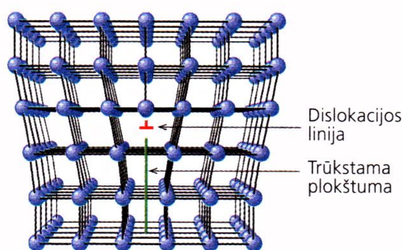
Visai kaip ir spyruoklių atveju, ištempus metalą tiek, kad atstumas tarp jo jonų padidėtų daugiau nei atitinka tiesinį ruožą jėgos ir pailgėjimo sąryšio kreivėje, pasireiškia plastiškumas. Atomai turi kažkaip persitvarkyti. Iš tikrųjų, atomų plokštumos juda viena kitos atžvilgiu (5.45 pav.), sakome – **slysta.** Reikalinga gana didelė jėga, kad nutrauktų ryšius, kuriais visi vienoje plokštumoje esantys atomai yra susieti su gretimos plokštumos atomais.

Plokštumai pasislinkus tam tikru atstumu, ryšiai tarp gretimų atomų gali vėl susidaryti. Taip ir atsitinka, kai atliekant įtempio ir deformacijos tyrimus bandinyje atsiranda susiaurėjimas, tačiau jis dar nenutrūksta. Galima manyti, kad slydimui sukelti reikia labai didelės jėgos. Tačiau netrukus pamatysime, kad dideliame metalo kristale plokštumų slydimą gali sukelti kur kas mažesnė jėga nei galima tikėtis.

Polikristaliniame metalo bandinyje atomai viename mažame kristalite išsidėstę ne toje pačioje plokštumoje kaip kaimyniniame kristalite: kristalitų sienelės nutraukia šias plokštumas. Tai kliudo slydimui sklisti metalu bet kuria kryptimi. Dideliuose metalų monokristaluose slydimas vyksta daug lengviau, nes atominės plokštumos nenutrūkdamos tęsiasi per visą monokristalą.

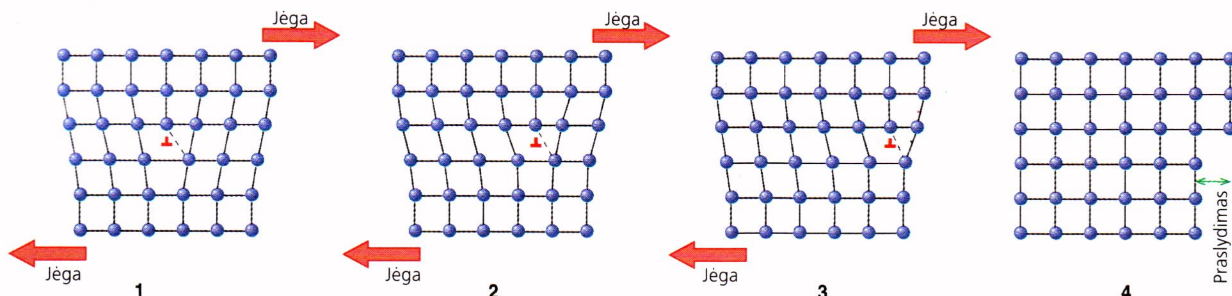


5.45 pav. **Slydimas idealiame kristale**



5.46 pav. **Dalis metalo kristalo su dislokacija**

Panagrinėkime tai nuodugniau. 5.45 pav. pavaizduotos ištisos atomų plokštumos, slenkančios viena kitos atžvilgiu. Tačiau kad ir koks švarus būtų metalo bandinys, jame vis tiek bus defektų. Vienas defektų tipas yra vadinamas **dislokacija.** Tai vieta gardelėje, kur nutrūksta viena atomų (ar jonų) plokštuma (žr. 5.46 pav.). Dislokacijos aplinkoje ryšiai silpnesni. Šlytį sukelianti jėga, veikianti kristalines plokštumas (5.47 pav.), gali pastumti vieną atomų plokštumą per vieną gardelės tarpsnį. Tam reikia mažesnės jėgos nei prireiktų daugeliui plokštumų perstumti.



5.47 pav. **Šlytį sukelianti jėga gali priversti dislokaciją judėti kristalu palaipsniui perstumdama ją per vieną gardelės tarpsnį. Šiuose dvimačiuose piešiniuose dislokacija, pažymėta sutartiniu apversto T raidės ženklu, juda nuo vienos atomų grupės prie kitos**

Dislokacijos padidina metalų tąsumą ir kalumą. Jau žinome, kad metalo atomai lengvai juda ir iš naujo sudaro ryšius (sluoksnių judėjimą galime įsivaizduoti kaip tekėjimą). Dėl to galima ištempti metalo vielą – jis yra tąsus. Be to, kalamas metalas dažniausiai neįskyla (jis netrapus), taigi jis dar ir kalus.

Dislokacijų judėjimo modeliai

Kilimo raukšlės judėjimas

Tarkime, ant grindų patiesėme kilimą ir norime jį išlyginti. Tai padaryti nelengva: reikia daug pastangų įveikti visoms jėgoms, dėl kurių kilimas sukimba su grindimis. Tačiau galime prie pat kilimo krašto padaryti raukšlę, kaip 5.48 pav. (tai susilpnina jėgas tarp kilimo ir grindų), ir perstumti tą raukšlę per visą kilimą. Kaip ir ties dislokacijos sudarytu laipteliu kristale (5.47 pav.), tokiam palaipsniam judėjimui sukelti pakanka daug mažesnės jėgos.

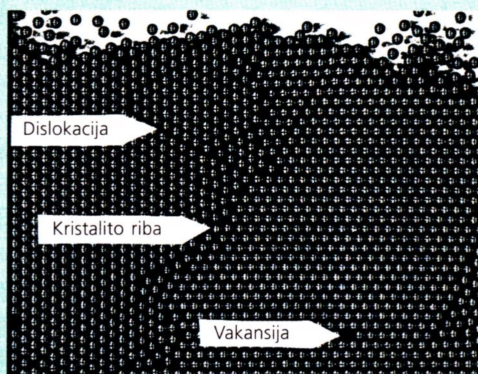


5.48 pav. **Raukšlės judėjimas kilimu. Raukšlė modeliuoja kristalo dislokaciją**

Kristalo modeliavimas guolio rutuliukais

Paprastą dvimatį kristalinės struktūros modelį galime pagaminti suspaudę tarp dviejų stiklo plokštelių daug mažų guolio rutuliukų (5.49 pav.). Rutuliukų sluoksnį reikėtų apriboti rėmeliu ir tą apribotą dalį beveik visą užpildyti, kad rutuliukai sudarytų gardelę, tačiau paliekant šiek tiek laisvės jų dvimačiam judėjimui.

Modelį krestelėjus, gardelėje išryškėja dislokacijos ir ribos tarp kristalitų. Atsiranda ir tuštymėlių. Jos analogiškos tuštumoms kristale, vadinamoms **vakansijomis,** kurios atsiranda ten, kur trūksta atomo. Vakansijų visada pasitaiko trimatėje kristalo gardelėje.



5.49 pav. **Kristalinės medžiagos modelis iš guolio rutuliukų. Matyti vakansijos, kristalitų (grūdelių) ribos ir dislokacijos**

6 KAIP SUSTIPRINTI METALUS

Ankstesniame skyrelyje matėme, kad medžiagos be priemaišų nebūna tvirtos, ypač kai jose yra mažai kristalitų sienelių. Jei medžiaga yra tempiama veikiant tokioms jėgoms, kurios sukelia deformaciją, sienelių skaičius gali labai išaugti. Toks sienelių raizginys gali padidinti stiprumą.

Įterpus kitų elementų atomų, pavyzdžiui, didesnių už esančius metalo gardelėje, galima pristabdyti dislokacijų plitimą ir sustiprinti medžiagą. Matėme, kad polikristalinėje medžiagoje sienelės tarp mažų kristalitų taip pat gali sustabdyti dislokacijų judėjimą. Todėl yra sudėtingiau deformuoti medžiagas, sudarytas iš mažų grūdelių, nei medžiagas, kurių kristalai dideli.

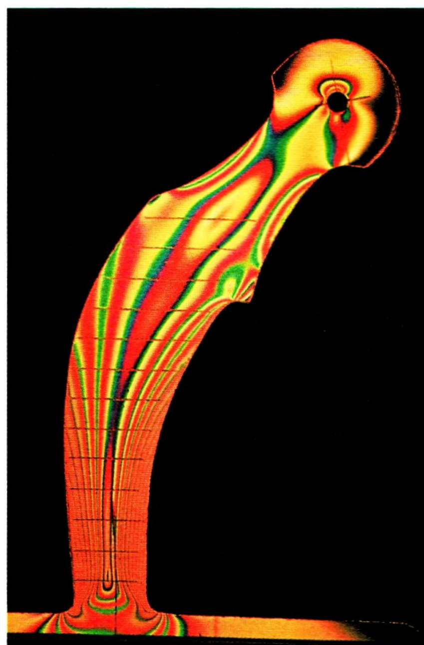
Sanglaudos defektai ir įtrūkimai mikrodariniuose

Dažniausiai medžiaga trapi, jei joje lengvai atsiranda ir plinta įtrūkimai. Medžiagos dažnai gaunamos vykstant cheminėms reakcijoms arba kaitinant ir liejant į reikiamas formas (prisiminkite kalvį ir jo žaizdrą). Vykstant šiems procesams ir esant sąlyčiui su oru, medžiagos paviršius gali susilpnėti. Milijonai smulkiausių defektų paviršiuje gali susikaupti ir sudaryti įtrūkimą. Vėliau, kai kūną veikia apkrova, šie smulkūs įtrūkimai gali **plisti.**

■ Žr. 15 klausimą.

Tai labai būdinga ketui, kuris buvo plačiai naudojamas devynioliktajame amžiuje Pramoninės revoliucijos laikotarpiu. Ankstyvųjų geležinkelių statyboje ketus daugiausia buvo naudojamas bėgiams ir tiltams. Tačiau sijose atsirasdavo įtrūkimų, ir daug avarijų įvykdavo dėl to, kad griūdavo tiltai. Beveik tokį patį pavojų sukeldavo ir pačių bėgių skilimai. Garvežiai buvo pajėgūs patraukti tokius sunkius keleivinių ir prekinių vagonų sąstatus, kad jų sukelti įtempiai būdavo artimi stiprumo ribai.

Daug vėliau, pradėjus gaminti reaktyvinius keleivinius lėktuvus, jų korpusų įtrūkimai sukeldavo katastrofas. Įtrūkimai atsiranda ten, kur didžiausia deformacija. Lėktuvuose įtrūkimai prasidėdavo langų pakraščiuose. Taip pat svarbu išvengti menčių ir korpusų įskilimų turbinose, naudojamose elektrai gaminti hidroelektrinėse. Inžinieriai stengiasi numatyti tokias problemas atlikdami bandymus su modeliais iš permatomų akrilinių plastikų, juos veikdami atitinkamai sumažintomis apkrovomis. Bandymų metu modelis stebimas poliarizuotoje šviesoje. Dėl šviesos interferencijos susidarančios spalvos (žr. 2-osios d. 16 skyrių) rodo, kaip deformacija pasiskirsčiusi modelyje. 5.50 pav. pateiktas pavyzdys, demonstruojantis deformacijas dirbtiniame šlaunikaulyje.

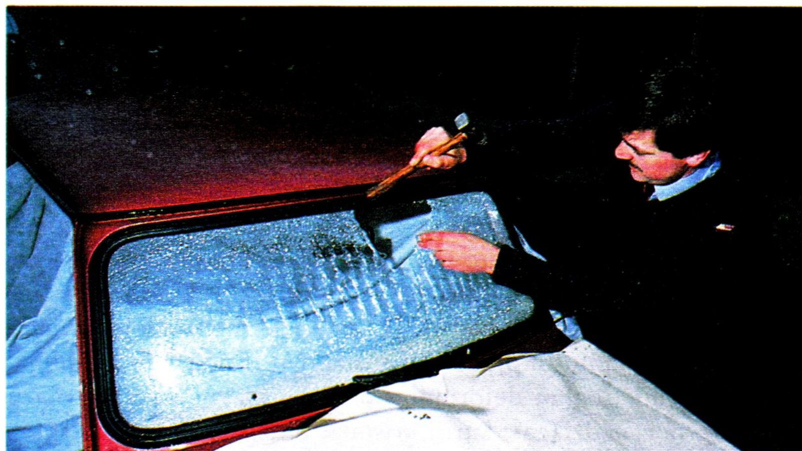


5.50 pav. **Deformacijos pasiskirstymas plastikiniame dirbtinio šlaunikaulio modelyje**

Įskilimai pavojingi tuo, kad jie nenuspėjami. Jie dažniausiai atsiranda, kai medžiaga keliskart įtempiama ir vėl atleidžiama. Pavyzdžiui, slėgis lėktuvo išorėje keičiasi kaskart jam pakylant ir nusileidžiant. Jei skrendate lėktuvu ir sėdite prie lango, galite pastebėti, kad lėktuvo sparnai nuolat lankstosi į viršų ir žemyn. Jei tokiomis sąlygomis eksploatuojamas daiktas lūžta, tai vadinama **suirimu dėl nuovargio.**

Stiklo kietinimas

Inžinieriai dažniausiai mieliau naudoja didesnio skerspjūvio detales iš silpnesnės medžiagos nei stipresnes medžiagas, kuriose



5.51 pav. **Automobilio priekinis stiklas subyra į mažus gabaliukus, ir taip sumažėja pavojus keleiviams**

lengviau susidaro įtrūkimai. Medis ne toks stiprus kaip stiklas, bet ne taip greitai lūžta, todėl tradiciškai jis dažniau naudojamas statybose. Pastaruoju metu taikomi stiklo paviršiaus apdorojimo metodai įgalina pagaminti daug patikimesnį stiklą. Todėl jis vis plačiau naudojamas dideliuose statiniuose.

Automobilių priekiniams stiklams gaminti taikomos įvairios technologijos. Laikantis vienos iš technologijų dalis jonų stiklo paviršiuje chemiškai pakeičiami didesnio skersmens jonais. Šie didesni jonai sukelia aplinkiniuose stiklo jonuose gniuždymo įtempį. Naudojant kitą technologiją stiklas šildomas kol suminkštėja, ir apipučiamas šalto oro srove. Dėl to stiklas paviršiuje pasidaro šaltesnis nei viduje. Paviršiuje susidaro gniuždymo įtempis, o viduje – tempimo įtempis.

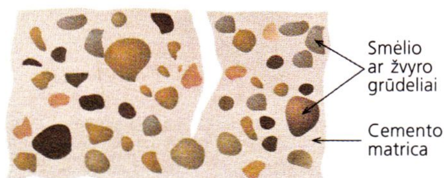
Abiem metodais pagaminto stiklo paviršius yra gniuždomas. Tai apsunkina įskilimų plitimą: jei ir atsirastų įskilimas, paviršiuje veikiančios gniuždymo jėgos jį suspaudžia. Tačiau jei įskilimas prasiskverbia giliau nei paviršinis sluoksnis, jis plinta itin sparčiai, kadangi vidinėje stiklo dalyje jau egzistuoja didelis tempimo įtempis, ir įskilimas plinta be pasipriešinimo. Kas tada atsitinka, pavaizduota 5.51 pav.

Stiklas yra **amorfinės** struktūros pavyzdys. Tai reiškia, kad molekulės išsidėsčiusios netaisyklingai. Daugiau apie kristalinius ir amorfinius kūnus sužinosite 7 skyriuje.

Kompozicinės medžiagos

Įskilimai gali sustoti, kai pasiekia atsparesnę medžiagą. Dėl to **kompozitai** gaminami ne iš vienos medžiagos. Vientisas komponentas vadinamas **matrica,** o į jį įterpiama viena ar keletas kitų atsparesnių medžiagų. Kai matricoje susidaro įskilimas, jis plinta kol pasiekia atsparesnį komponentą. Pavyzdžiui, betonas: įskilimas plinta trapiu cementu, tačiau sustoja, pasiekęs smėlio ar žvyro dalelę. (Netgi iš dviejų gana trapių medžiagų galima pagaminti atsparesnį kompozitą.)

Kompozitų sutvirtinimui dažnai naudojamas stiklas. Pavyzdžiui, stiklo plastikas, naudojamas valčių korpusų gamybai. Gumingoje matricoje susiformavęs įskilimas plinta, kol pasiekia stiklo skaidulą. Ši skaidula tada šiek tiek atšoka nuo matricos, įtempis apie skaidulą susilpnėja, ir įskilimas toliau nebeplinta. Staigus smūgis sukelia tūkstančius smulkiausių įskilimų, tačiau jie nesusijungia į vieną pavojingą plyšį. Medžiaga išlieka tokia pat stipri, kaip iki smūgio.



5.52 pav. **Įskilimų stabdymas betone**

Medžiagų savybių aprašymas

Medžiagų savybėms aprašyti vartojami techniniai terminai turi tikslią prasmę, kuri ne visada sutampa su kasdienine tų žodžių vartojama prasme.

Terminas	Prasmė ir pavyzdys
trapi	Lūžta staiga ir lūžus susidaro pavojingai aštrios briaunos; susiformavęs įskilimas lengvai sklinda; plytos ir keramika yra trapios medžiagos
atspari	Termino „trapus" antonimas; medžiaga priešinasi įskilimų plitimui, todėl lengviau deformuojasi nei lūžta; nailonas, virvė, kaulai, sausgyslės ir dauguma audinių yra atsparūs
tvirta	Reikia didelio įtempio, kad tokia medžiaga suirtų; plienas, titano lydiniai, guma, stiklas, mediena (išilginė) ir medvilnė yra tvirti (čia paminėti metalai yra maždaug dešimt kartų tvirtesni nei nemetalai)
tampri	Toks kūnas atgauna savo pradinį ilgį (formą) pašalinus apkrovą; gumos, plieno, stiklo ir medienos tamprumas yra pakankamas daugeliui taikymų – gana didelės jėgos nesukelia šiose medžiagose liekamosios deformacijos
plastiška	Kūnas lengvai keičia formą, veikiant netgi nedideliam įtempiui, tačiau nelūžta; plastilinas ir drėgnas molis yra būdingos plastiškos medžiagos; metaluose ir lede plastiškumas pasireiškia, jei įtempis veikia ilgą laiką (metalų valkšnumas, ledynų tekėjimas)
kieta	Kietas medžiagas sunku pjauti; deimantas yra kietas, grafitas minkštas (kietumas vertinamas nuo 1 iki 10 pagal Moso (*Mohs*) skalę)
minkšta	Termino „kietas" antonimas
kali	Kūnas keičia formą, bet neskilinėja staiga paveikus didele jėga (pvz., kalant kūju); daugelis metalų (pvz., varis) yra kalūs
tąsi	kūnas keičia formą, bet neskilinėja veikiant didele pastovia jėga; savybė būdinga metalams, iš kurių galima ištempti vielas, jei jie tempiami pro mažą skylutę

Pavyzdžiai

Keramika yra silpna ir trapi, *stiklas* tvirtas ir trapus, *styga* minkšta, tampri ir gana tvirta, *guma* minkšta ir tampri, *plienas* kietas ir tamprus, *medis* minkštas, atsparus, gana tamprus ir tvirtas.

?

K Kiek galima išsamiau ir aiškiau aprašykite mechanines savybes (atsaką į veikiančią jėgą) trijų iš šių medžiagų: sūrio gabalo, laikraščio skiautės, stygos galiuko, plastikinės liniuotės, aliumininės folijos lakšto. Apibūdinimui vartokite terminus, pateiktus lentelėje greta, bei kitus tinkamus žodžius.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių apie konstrukcijas ir medžiagas turėjote išmokti ir suprasti štai ką:

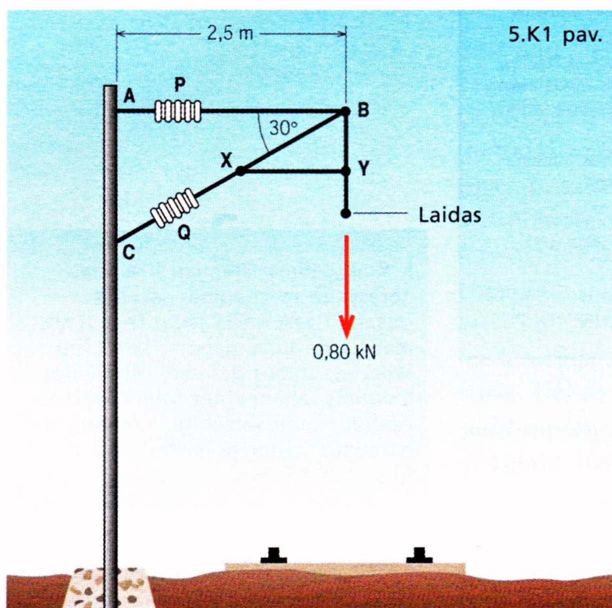
- Jėga veikia į vieną tašką, o jėgų momentai yra pusiausvyroje, jei kūnas juda be pagreičio.
- Huko dėsnis teigia: pailgėjimas x yra proporcingas veikiančiai jėgai F: $F = kx$, kur k yra spyruoklės konstanta.
- Nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtų spyruoklių savybes.
- Svarbiausias sąvokas: **įtempis,** apibrėžiamas kaip jėga/plotas, F/A, ir **santykinė deformacija,** apibrėžiama kaip pailgėjimas/ilgis, x/L.
- Jungo modulis tampriam kūnui yra lygus santykiui įtempis/deformacija, $E = FL/Ax$.
- Deformavimo, kurį patiria kūnai ir konstrukcijos, rūšys yra tokios: tempimas, lenkimas, šlytis.
- Metalai deformuojasi ir tampriai, ir plastiškai, bei turi tamprumo ribą.
- Ištemptame kūne (pvz., spyruoklėje) sukaupta energija randama pagal formulę $E = \frac{1}{2}kx^2$.
- Kūnų mechaninėms savybėms ir medžiagų rūšims apibūdinti vartojami terminai: trapus, atsparus, tvirtas, kietas, tamprus, plastiškas, kalus, tąsus, kristalinis, polikristalinis, amorfinis, sudėtinis.
- Medžiagų savybes galima paaiškinti jų mikrodarinio ypatumais nagrinėjant jėgas, veikiančias tarp dalelių (atomų ir molekulių), ir tarp didesnių darinių (kristalų, kristalitų); didelę reikšmę turi kristalo defektai.
- Įskilimų svarba procesuose, dėl kurių medžiaga neatlaiko apkrovos; specifiniai metodai, taikomi įskilimų plitimui sustabdyti.
- Kriterijai, pagal kuriuos parenkamos medžiagos įprastiniams statiniams: pastatams, tiltams, ūkio objektams.

KLAUSIMAI

1 5.K1 pav. parodytas kontaktinio tinklo elektros linijos atramos naujai statomam greitajam geležinkeliui projektas. Jungtys A, B ir C yra šarnyrinės. Kai linija nenaudojama, šią sistemą veikianti efektyvioji apkrova atitinka vertikalią 80 kN jėgą. Standi sąrama XY normaliomis sąlygomis neveikia nei laido, nei spyrio CB.

a) **(i)** Apskaičiuokite jėgas, veikiančias izoliatorius P ir Q nurodytomis sąlygomis.
(ii) Nurodykite, ar kiekviena iš šių jėgų tempianti, ar gniuždanti.

b) Paaiškinkite, kam konstrukcijoje panaudota sąrama XY.



5.K1 pav.

2 Tam tikrai spyruoklių rūšiai galioja Huko dėsnis, o jų jėgos konstantos lygios 2×10^2 N · m^{-1}.

a) Kiek pailgės tokia spyruoklė, prie jos prikabinus 100 N apkrovą?

b) Dvi spyruoklės yra sujungtos nuosekliai. Koks bus bendras pailgėjimas, veikiant 100 N jėgai?

c) Konstruktorius nori panaudoti šios rūšies spyruokles tokiame įrenginyje, kuriame 200 N apkrova turėtų sukelti maždaug 3 cm pailgėjimą. Kaip reikėtų sujungti spyruokles, kad būtų patenkintas šis reikalavimas?

3 Nailoninės alpinistinės virvės skersmuo 10 mm, ilgis 30 m. Kai už jos laikosi pakibęs 80 kg sveriantis alpinistas, virvė pailgėja 1 m.

a) apskaičiuokite Jungo modulį nailonui.

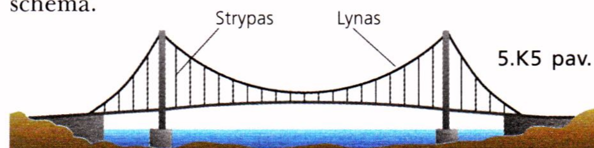
b) Įsivaizduokite situaciją: alpinistas krinta per visą virvės ilgį. Panagrinėkite, kas atsitiktų, jei virvė būtų pagaminta iš medžiagos, kurios Jungo modulis yra **(i)** dešimt kartų mažesnis nei nailono, **(ii)** dešimt kartų didesnis nei nailono (matmenys būtų tie patys).

4 Metalinio bėgio ilgis 20 m, o skerspjūvio plotas 10^{-2} m^2. Temperatūrai pakilus vienu Celsijaus laipsniu, kiekvienas to bėgio metras pailgėja po 10^{-5} m. Šio metalo Jungo modulis 18×10^{10} N · m^{-2}.

a) Kiek pailgės bėgis pakilus temperatūrai nuo 10 °C iki 35 °C?

b) Kokia jėga bėgis veiks įtvirtinimą, jei jis yra įtvirtintas taip, kad neturi galimybės plėstis?

5 5.K5 pav. parodyta supaprastinta kabančiojo tilto schema.



5.K5 pav.

Važiuojamąją dalį laiko cilindriniai strypai, pritvirtinti prie abiejose tilto pusėse pakabintų lynų.
Kiekvienai strypų porai tenka 5,0 m važiuojamosios dalies, kurios ilgio vieneto masė yra lygi $2{,}0 \times 10^3$ kg · m^{-1}. Ilgiausi strypai yra 55 m ilgio, o jų skerspjūvio plotas lygus $5{,}0 \times 10^{-3}$ m^2.
Plieno Jungo modulis lygus $2{,}0 \times 10^{11}$ Pa.
Laisvojo kritimo pagreitis g = 10 m · s^{-2}.

a) Tarę, kad proporcingumo ribos neviršytos, apskaičiuokite:
(i) kiekvieną strypą veikiančios apkrovos dydį,
(ii) tempimo įtempį ilgiausiame strype,
(iii) tempimo santykinę deformaciją ilgiausiame strype.

b) **(i)** Kokie pokyčiai vyksta strype, kai tiltu važiuoja sunkvežimis?
(ii) Paaiškinkite, kodėl įskilimai strypuose, naudojamuose tiltų statyboje, gali sukelti jų avarijas.

6 Tiriant plieninę lovos čiužinio spyruoklę gauti tokie rezultatai:

Jėga (N)	0,00	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00	90,00	105,00	120,00
Ilgis (mm)	100,00	90,00	80,00	70,00	60,00	52,00	46,00	42,00	40,00

a) Nubraižykite grafiką, vaizdžiausiai parodantį spyruoklės savybes.

b) Paaiškinkite, kodėl spyruoklė pagaminta taip, kad jos tamprumo koeficientas priklausytų nuo apkrovos.

c) Vidutinė žmogaus masė yra 60 kg. Kiek reikia spyruoklių, kad kūnas nugrimztų į čiužinį 3 cm?

d) Kiek energijos susikaupia kiekvienoje spyruoklėje, kai ji suspaudžiama 3 cm?

e) Apskaičiuokite spyruoklės jėgos konstantą tiesiniame ruože.

7 Pasinaudokite lentelėje (94 psl.) pateiktais tamprumo ir tempimo stiprio duomenimis ir nustatykite, ar šioms medžiagoms egzistuoja sąryšis tarp Jungo modulio ir tempimo stiprio.

8 Nubraižykite įtempio ir santykinės deformacijos sąryšio grafiką medžiagoms, iš kurių gaminami: **(i)** saugos diržai, **(ii)** lėktuvo katapultos varžtai, **(iii)** garsiakalbio ruporai, **(iv)** virvės, ant kurių kabinami vaikiški batutai. Paaiškinkite kiekvieną grafiką.

9 Šis klausimas – apie energiją, sukauptą ištemptoje medžiagoje. Peržvelkite 100–101 puslapius, kur išdėstyti pagrindai, kuriuos žinodami galėsite atsakyti į šį klausimą. Taigi įsitikinkite, kad ištemptos medžiagos tūrio vienete sukaupta energija yra lygi

$\frac{1}{2}$ įtempio × santykinė deformacija

a) Įrodykite, kad energiją, sukauptą įtemptoje ilgio *L* vieloje, kurios skerspjūvio plotas *A*, o Jungo modulis *E*, aprašo formulė $\frac{1}{2}Eax^2/L$, kur *x* yra tempiančios jėgos sukeltas pailgėjimas.

b) Kurią formulės dalį galima pakeisti įtempiu? Užbaikite formulę:

Sukaupta energija = $\frac{1}{2}$ santykinės deformacijos × ?

c) Dabar į formulę įrašykite reikšmę – *E* = įtempis/santykinė deformacija.

d) Pasinaudokite santykinės deformacijos apibrėžimu: **santykinė deformacija = *x/L*.**

e) Paaiškinkite, kodėl formulė, gauta atsakant į klausimo dalį **d),** yra ekvivalenti teiginiui, kad ištempto kūno tūrio vienete sukaupta energija yra lygi $\frac{1}{2}$ įtempio × santykinė deformacija.

10 Namų statybai naudojamos betoninės sijos paprastai gaminamos su išankstiniu įtempimu, t. y. į skystą betoną įterpiamos įtemptos plieninės vielos, kurios išlieka įtemptos ir sukietėjus betonui. Paprastai sija gaminama taip: 20 tokių 6 m ilgio ir 2 mm skersmens plieninių vielų ištempiamos iki 0,15% santykinės deformacijos ir užpilamos betonu. Tam naudojamo plieno Jungo modulis yra 2×10^{11} N · m^{-2}.

a) Koks energijos kiekis sukauptas įtemptoje vieloje?

b) Paaiškinkite, kodėl griaunant pastatus, kuriuos statant buvo panaudotos įtemptos sijos, reikia imtis ypatingų atsargumo priemonių.

11 Kai kurių naudingų konstrukcinių medžiagų tankiai ir Jungo moduliai pateikti lentelėje.

	Jungo modulis (10^{10} kg · m^{-3})	Tankis (10^3 kg · m^{-3})
Aliuminis	70	2,7
Plienas	20	7,8
Molibdenas	27	10,5
Titanas	12	4,5
Magnis	42	1,7
Mediena (melsvosios eglės)	1,3	0,5
Stiklas (pvz., lango)	7	2,5
Anglies pluoštas	7,5	2,3

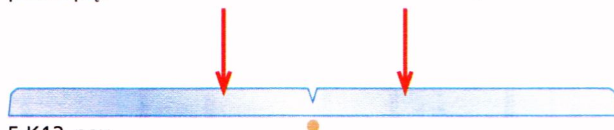
a) Naudodamiesi šiais duomenimis nubraižykite Jungo modulio sąryšio su tankiu grafiką.

b) Pakomentuokite pagrindinius šio grafiko ypatumus.

c) Paaiškinkite, kodėl viena iš šių medžiagų vis plačiau taikoma ten, kur reikia lengvų, stiprių medžiagų, ir pateikite tris tokių prietaikų pavyzdžius.

d) Pasiūlykite, kaip aprašyti sąryšį tarp lentelėje pateiktų medžiagų tankio ir tamprumo modulio. Patikrinkite pasiūlytą sąryšį – papildykite grafiką jums žinomais duomenimis apie kitas medžiagas. Ar jūsų „dėsnis“ galioja visoms medžiagoms?

12 Stiklą, keramines plyteles ir grindų plokštes galima perpjauti tiesiomis linijomis negiliai įrėžiant išilgai norimos linijos ir po to laužiant abipus rėžio (5.K12 pav.). Paaiškinkite šio metodo veikimo principą.



5.K12 pav.

13 Paaiškinkite, kodėl betonas yra daug atsparesnis gniuždymui negu tempimui.

14 Apibūdinkite bet kurią jums žinomą kompozicinę medžiagą. Paaiškinkite, kodėl gaminamas toks kompozitas, ir susiekite jo savybes su panaudojimo sritimis.

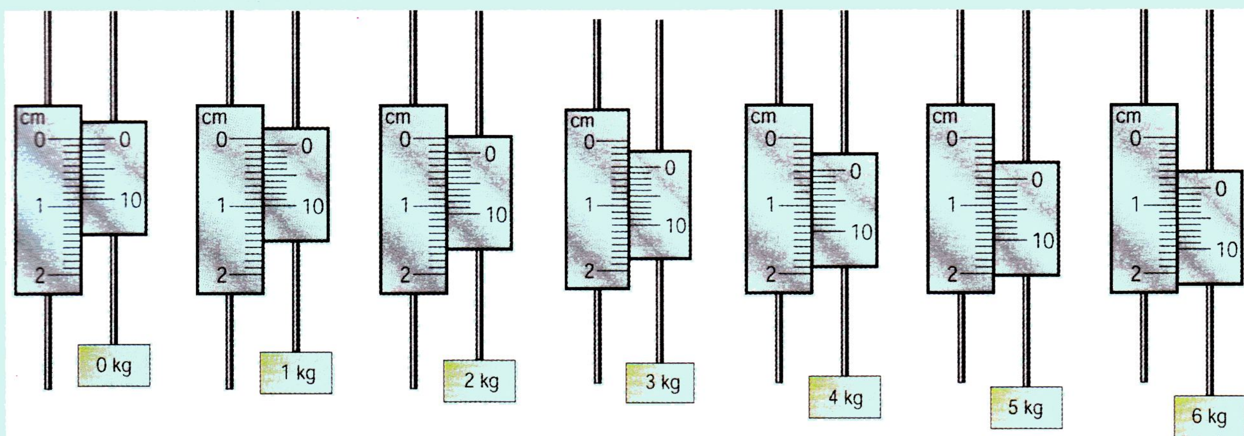
15 Kodėl jėgos, veikiančios tarp metalo atomų (metalinis ryšys), dažniausiai ne tokios svarbios metalo stiprumui kaip kiti metalo struktūros ypatumai?

16 400 km gylyje nuo Žemės paviršiaus slėgis yra maždaug $1,4 \times 10^{10}$ Pa. Kokį tūrį užimtų vienas kubinis metras kietos uolienos (Jungo modulis: 7×10^{10} N · m^{-2}), perkeltas iš ten į paviršių? Nurodykite dvi priežastis, kodėl uoliena turėtų išsilydyti.

Užduotis

METALŲ JUNGO MODULIS IR TEMPIMO STIPRIS

Šioje užduotyje pagal eksperimento duomenis nustatysite metalinės vielos Jungo modulį. Dvi vielos pakabintos panaudojant nonijaus skalę, kaip parodyta 5.U1 pav.



5.U1 pav. **Nonijaus skalės parodymai, kai dešiniąją vielą veikia vis didesnės apkrovos**

Kairiąją vielą laiko įtemptą po ja pakabintas pastovios masės svarmuo. Dešinioji viela apkraunama skirtingomis apkrovomis, ir jos pailgėjimas matuojamas naudojantis nonijaus skale. Bandomosios vielos ilgis nuo pakabinimo taško iki nonijaus yra 2,10 m, jos skersmuo yra pastovus ir lygus 0,41 mm.

5.U1 lentelė. **Duomenys apie antrąją vielą**

Apkrova (kg)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0	7,2
Pailgėjimas (cm)	0,00	0,020	0,036	0,056	0,076	0,095	0,120	0,220	0,552	0,822

1

a) Pagal nonijaus skalę nustatykite skirtingų apkrovų sukeltus pailgėjimus. Gautus duomenis surašykite į lentelę ir nubraižykite apkrovos sąryšio su pailgėjimu grafiką. (Lentelę sudarykite ir grafiką braižykite naudodamiesi dinamine duomenų lentele.)

b) Neperbraižydami grafiko aprašykite, kaip reikėtų perskaičiuoti jūsų duomenis, jei norėtumėte *y* ašyje atidėti įtempį, o *x* ašyje – santykinę deformaciją.

2 Apskaičiuokite vielos Jungo modulį. Gautąją vertę palyginkite su lentelėje pateiktais Jungo moduliais įvairiems metalams ir atspėkite, iš kokio metalo pagaminta ši viela. (Tai turėtų būti gana paplitęs metalas.)

3 5.U1 lentelėje pateikti duomenys apie antrąją vielą, kuri yra plieninė, 0,80 mm skersmens ir to paties 2,10 m ilgio. Duomenis atvaizduokite grafiškai ir gautą grafiką palyginkite su pirmajai vielai sudarytu grafiku. Aprašykite visus svarbesnius skirtumus ir paaiškinkite jų priežastis. Kaip manote, kas atsitiktų nuėmus antrosios vielos apkrovą?

4 Apskaičiuokite antrojo bandinio Jungo modulį.

5 Pirmojo bandinio apkrova didėjo nuo 0,0 kg iki 6,0 kg. Apskaičiuokite:

a) vielos tamprumo potencinės energijos pokytį,

b) apkrovos potencinės energijos pokytį,

c) apkrovos ir vielos bendros potencinės energijos pokytį.

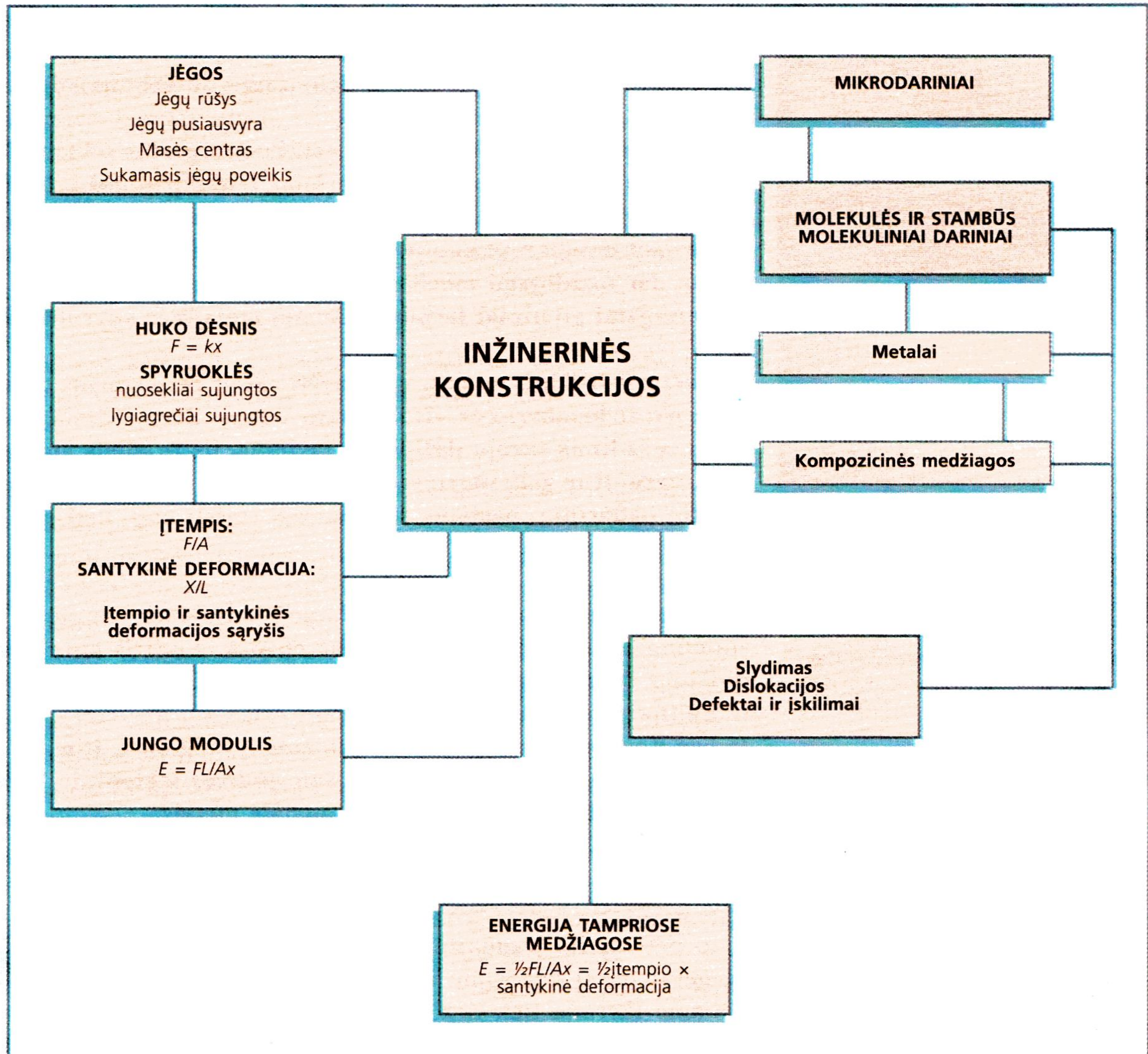
Pakomentuokite gautas vertes.

6 Viela, padaryta iš to paties plieno kaip ir antrasis bandinys, naudojama 1 tonos kroviniui pakelti.

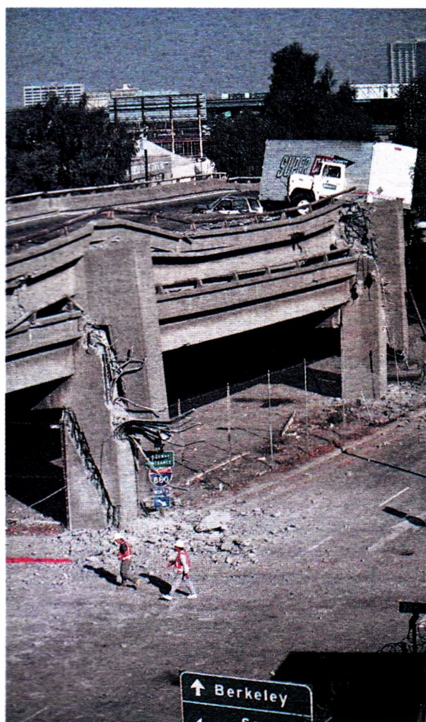
Tarkime, saugumo koeficientas yra 5; įvertinkite reikalingą vielos skersmenį. Ar manote, kad šis plieno lydinys čia tinkamas?

MEDŽIAGOS IR JĖGOS

Pagrindinės sąvokos, aprašančios kūnus veikiančias jėgas ir medžiagų struktūros ypatumus, yra apibendrintos šioje skyriaus schemoje, kuri parodo ir šių sąvokų tarpusavio sąryšį. Naudodamiesi šia schema galite pasitikrinti, kaip čia aptariamos sąvokos atitinka jūsų mokymosi programą. Schema taip pat turėtų padėti apsispręsti, kokias sritis jums reikėtų pastudijuoti toliau.



6 Virpesiai ir mechaninės bangos



Viršutinė dviejų aukštų estakados dalis, užkritusi ant žemutinės dalies, kur savo automobiliuose buvo suspausti 80 žmonių, kai autostrada Ouklende, esančiame netoli *San Andreas* tektoninio lūžio Kalifornijoje, nukentėjo nuo Žemės drebėjimo 1989 metais

Pačios galingiausios ir turinčios didžiausią griaunamąją jėgą mechaninės bangos gamtoje susidaro Žemės drebėjimų metu. Jos vadinamos seisminėmis bangomis (graikų k. *seismos* reiškia drebėjimą). Žemės drebėjimas gali įvykti beveik bet kurioje pasaulio vietoje, laimė, Britanijoje jie nebūna stiprūs.

Stiprūs Žemės drebėjimai vyksta arti Žemės plutos tektoninių lūžių. Ten architektams ir inžinieriams tenka paplušėti, kad apsaugotų pastatus ir kitus statinius. Atsparumas padidinamas naudojant daugiau plieno ir betono nei įprasta kitose vietose. Be to, dar naudojami mechaniniai slopintuvai, į atramas įmontuojami guminiai tarpikliai ar net metalinės spyruoklės.

Kūnas, pavyzdžiui, varpas, gali turėti savąjį rezonansinį dažnį. Taip pat ir kambario ar viso pastato sienos. Žemės drebėjimo metu sužadinus savojo dažnio svyravimus, jis pradeda smarkiai svyruoti ir gali sugriūti. Todėl, siekiant išvengti galimų sunkių padarinių, pastatus stengiamasi statyti taip, kad jie neturėtų savojo dažnio.

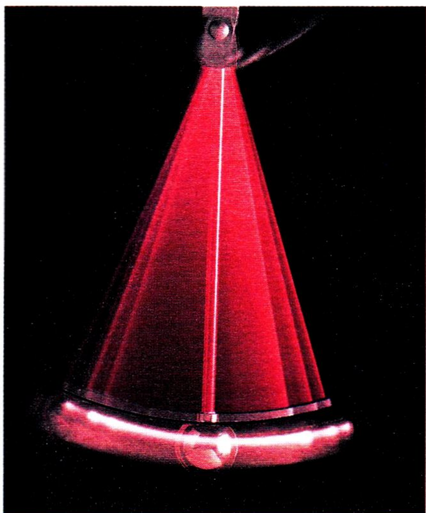
Apsaugoti daugiaaukščius namus nuo sugriovimo yra gana sudėtinga, tačiau, kaip po daugelio chaosą ir mirtis atnešusių didžiųjų Žemės drebėjimų įsitikino kelių inžinieriai Japonijoje ir Kalifornijoje, dar sunkiau išvengti estakadų griuvimo. Dabar Kalifornijoje su nerimu laukiama „didžiojo", itin stipraus Žemės drebėjimo išilgai *San Andreas* tektoninio lūžio. Spėjama, kad jis gali įvykti artimiausiais metais.

Šio skyriaus sąvokos

Kaip perskaitėte įvade, mūsų kasdieniniam saugumui labai svarbu gerai žinoti svyravimų ir mechaninių bangų savybes.

Šiame skyriuje šiek tiek panagrinėsime svyravimus aprašančią teoriją apskritai ir **paprastąjį harmoninį judėjimą** konkrečiai. Taip pat aptarsime svyravimų **slopinimą** ir jo praktinį taikymą, pavyzdžiui, automobilių pakabų sistemose.

Stacionarios, kitaip – **stovinčiosios** bangos yra ypač svarbios muzikoje. Mes pasigilinsime į šių bangų teoriją ir panagrinėsime jų susidarymą tokiuose instrumentuose kaip gitara ir vargonų vamzdžiai.



6.1 pav. **Jei svyravimo kampas nedidelis, kiekvieno švytuoklės svyravimo trukmė yra ta pati. Galilėjus tai nustatė stebėdamas Pizos katedroje už ilgos grandinės pakabinto sietyno svyravimus**

1 PAPRASTASIS HARMONINIS SVYRAVIMAS

Dauguma esate kada nors matę senelio laikrodį su švytuokle (6.1 pav.). Švytuoklė jame reikalinga tam, kad svyruodama pirmyn ir atgal per tam tikrą, visada tą patį laiką, švytuoklė labai tiksliai valdytų laikrodžio mechanizmo judėjimą.

Švytuoklė yra **osciliatoriaus** pavyzdys. Ji juda pirmyn ir atgal reguliariai (periodiškai, žr. 6.2a) pav.). Švytuoklės **periodu** vadinamas laikas, per kurį ji atlieka vieną pilną svyravimą ir grįžta į pradinę padėtį. Tokių svyravimų skaičius per laiko vienetą vadinamas **dažniu.** Atstumas, kuriuo švytuoklės pasvaras nukrypsta nuo vidurinės padėties pusiausvyros, vadinamas **nuokrypiu,** o maksimalus nuokrypis – svyravimo **amplitude.**

Kitas osciliatoriaus pavyzdys – aukštyn ir žemyn svyruojantis pasvaras, pakabintas spyruoklės gale (žr. 6.2b) pav.). Čia judėjimas irgi vyksta aukštyn ir žemyn nuo vidurinės padėties.

Nuokrypis turi kryptį, taigi jis yra vektorius. Ant spyruoklės pakabinto pasvaro atveju nuokrypis x, kaip ir amplitudė, yra matuojamas metrais. Švytuoklės nuokrypis matuojamas kampu θ, dažniausiai radianais.

Periodas T matuojamas sekundėmis. Dažnis f nusakomas svyravimų skaičiumi per sekundę, todėl šiuo atveju turime atvirkštinį sąryšį:

$$f = \frac{1}{T}$$

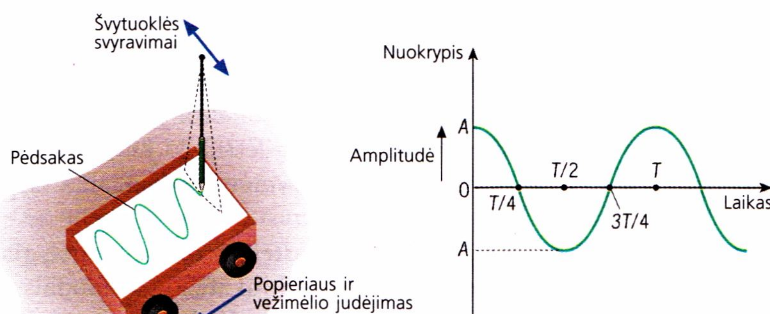
Matome, kad dažnio vienetas yra sekundė$^{-1}$ (t. y. s^{-1}). Šis dažnio vienetas vadinamas hercu (Hz). Tai reiškia, kad:

$$\mathbf{1\ Hz = 1\ s^{-1}}$$

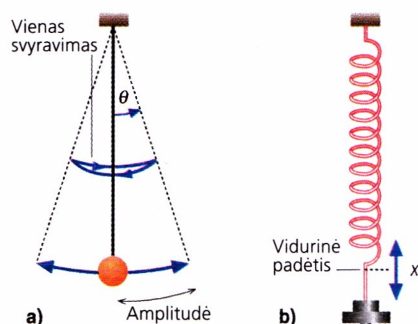
Daugiau apie svyravimus sužinoti galima prie švytuoklės pritaisius rašiklį, ir paleidus švytuoklę svyruoti virš traukiamos popieriaus juostos, pritvirtintos kad ir prie laboratorinio vežimėlio, judančio statmenai svyravimų plokštumai. Kaip parodyta 6.3 pav., rašiklis palieka pėdsaką, kuris rodo, kaip nuokrypis priklauso nuo laiko. Įvykių seka yra tokia.

- Laiko momentu $t = 0$ svyravimai prasideda paleidus švytuoklę judėti iš maksimalaus nuokrypio padėties. Šis nuokrypis yra svyravimų amplitudė A.
- Švytuoklės nuokrypis lygus nuliui (ji kabo vertikaliai) laiko momentu $t = T/4$.
- Laiko momentu $t = T/2$ švytuoklė maksimaliai nukrypusi į priešingą pusę nei buvo pradžioje.
- Švytuoklės nuokrypis vėl lygus nuliui laiko momentu $t = 3T/4$, kai grįždama atgal ji vėl praeina vertikalią padėtį.
- Per laiko tarpsnį T švytuoklė atlieka pilną svyravimą ir grįžta į pradinę padėtį.

Jei žinote, kaip atrodo cos θ grafikas, tai šią kreivę atpažinsite 6.3 paveiksle.



6.3 pav. Švytuoklės nuokrypio priklausomybė nuo laiko



6.2 pav. **Svyruojančių sistemų pavyzdžiai:** a) **švytuoklė;** b) **ant spyruoklės pakabintas pasvaras**

Radianas atitinka apskritimo centrinį kampą (centras šiuo atveju atitinka švytuoklės ašį), esantį prieš lanką, kurio ilgis yra lygus to apskritimo spinduliui. (Čia spindulys yra lygus švytuoklės ilgiui.)

?

A Koks yra 1,25 x 10^{-3} s periodu svyruojančio osciliatoriaus dažnis (hercais)?

B a) Nupieškite arba naudodamiesi grafiniu kalkuliatoriumi atvaizduokite cosθ priklausomybę nuo θ intervale nuo 0° iki 360°.

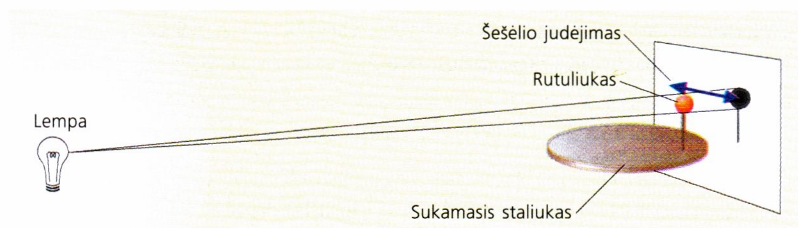
b) Nurodykite du požymius, kuriais šešėlio judėjimas 6.4 paveiksle primena švytuoklės harmoninį svyravimą.

Taip virpančios sistemos judėjimas yra vadinamas **paprastuoju harmoniniu svyravimu;** daugelis muzikos instrumentų sukelia šios rūšies virpesius. Sakoma, kad taip judančio taško nuokrypis kinta pagal **sinuso dėsnį,** t. y. pagal sinuso (arba kosinuso) kreivę.

Laboratorinis vežimėlis 6.5 paveiksle demonstruoja Huko dėsnį (žr. 88 psl.).

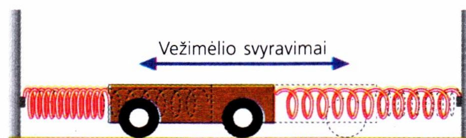
Paprastojo harmoninio svyravimo atvaizdavimas apskritimu

Nagrinėjant paprastąjį harmoninį svyravimą naudinga susieti jį su judėjimu apskritimu. Kaip parodyta 6.4 pav., galime pritvirtinti rutuliuką prie sukamojo stalelio krašto ir suprojektuoti ekrane rutuliuko šešėlį. Sukantis staliukui, rutuliuko šešėlis ekrane juda pirmyn ir atgal panašiai kaip švytuoklės pasvaras.



6.4 pav. **Apskritimu besisukančio kūno šešėlis iliustruoja harmoninį svyravimą**

Dar galima panaudoti tarp atramų stumdomą laboratorinį vežimėlį su registravimo įtaisu svyravimams užfiksuoti (6.5 pav.).



6.5 pav. **Svyruojantis vagonėlis, prikabintas tarp dviejų vienodų spyruoklių**

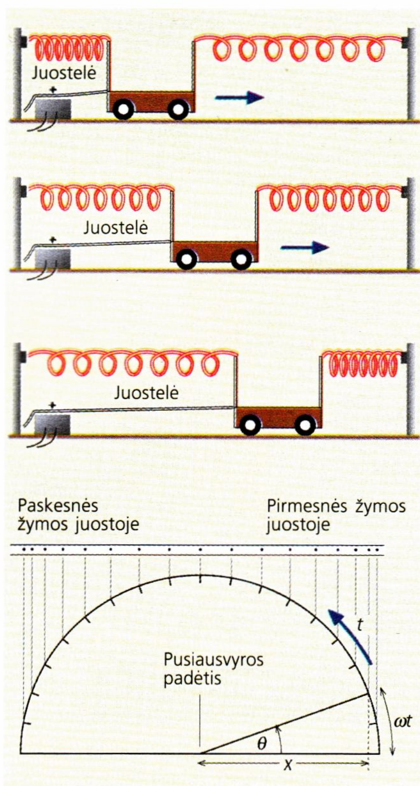
Dviem vienodomis spyruoklėmis vagonėlis prikabinamas prie dviejų atramų. Esant pusiausvyrai, vežimėlis yra vidurinėje padėtyje tarp atramų, o abi spyruoklės jį stumia ta pačia jėga priešingomis kryptimis. Vežimėlį pastūmus į šoną, abi spyruoklės veikia jį lygiomis jėgomis, proporcingomis nuokrypiui x ir grąžinančiomis vežimėlį į vidurinę padėtį.

Šią grąžinančiąją jėgą F galima išreikšti taip:

$$F = -kx,$$

kur k yra dviejų spyruoklių sistemos jėgos konstanta. Atkreipkite dėmesį, kad, kai viena spyruoklė yra suspausta ir stengiasi atsitiesti, kita yra ištempta ir stengiasi susitraukti. Kai vežimėlis grįžta iki vidurinės padėties, jis turi greitį ir tą padėtį pravažiuoja. Jis juda toliau, kol pasiekia maksimalų nuokrypį kitoje pusėje.

Vagonėlio padėties kitimą laike galime pasekti vagonėlį prijungę prie registravimo įtaiso (6.6 pav.). Vagonėliui judant iš vieno maksimalaus nuokrypio nuo vidurinės padėties iki kito maksimalaus nuokrypio, gausime seką taškų, pažymėtų lygiais laiko tarpsniais.



6.6 pav. **Vežimėlio judėjimo sąryšis su tolydiniu judėjimu apskritimu**

Matysime, kad taškai popieriaus juostelėje išsidėstę nelygiais atstumais, tačiau galima nubrėžti juos atitinkančius, vienodais intervalais pasiskirsčiusius ant pusapskritimio lanko, kaip parodyta 6.6 pav. Atrodo, tarsi taškas pastoviu kampiniu greičiu judėtų ap-

skritimu, panašiai kaip 6.4 pav. atvaizduotas rutuliukas tolygiai judėjo apskritimu su sukamuoju staliuku.

Per periodą T taškas apsisuks pilną apskritimą, atitinkantį 2π radianų kampą. Kampinis greitis ω gaunamas padalijus pasisukimo kampą iš laiko. Tai yra:

$$\textbf{Kampinis greitis } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

6.6 pav. matyti, kad svyruojančio vežimėlio nuokrypis yra aprašomas taip:

$$x = A\cos\theta = A\cos\omega t,$$

kur A yra svyravimo amplitudė.

PAVYZDYS

K Vežimėlio svyravimų amplitudė 5,0 cm, periodas 2,5 s. Koks bus jo nuokrypis nuo pusiausvyros padėties, praėjus 0,4 s ir 1,0 s po to, kai jis pradeda judėti iš maksimalaus nuokrypio padėties?

A Pirmiausia reikia rasti ω radianais. (Jūsų kalkuliatorius turi būti nustatytas skaičiuoti radianais.)

Matėme, kad $\omega = 2\pi f$, o $f = 1/T$. Todėl:

$$f = \frac{1}{2{,}5} = 0{,}4\,\text{Hz ir } \omega = 2\pi \times 0{,}40\,\text{s}^{-1}$$

Iš čia randame nuokrypį po 0,4 s:

$$\begin{aligned} x &= A\cos\omega t \\ &= 5{,}0\cos(2\pi \times 0{,}40 \times 0{,}4) \\ &= 5{,}0\cos(1{,}01) \\ &= 2{,}7\text{ cm} \end{aligned}$$

Taigi vežimėlis yra 2,7 cm atstumu nuo pusiausvyros padėties toje pačioje pusėje, iš kurios pradėjo judėti.

Po 1,0 s:

$$\begin{aligned} x &= 5{,}0\cos(2\pi \times 0{,}40 \times 1{,}0) \\ &= 5{,}0\cos(2{,}51) \\ &= -4{,}0\text{ cm} \end{aligned}$$

Taigi vežimėlis yra 4,0 cm atstumu nuo pusiausvyros padėties į kitą pusę nei buvo pradėdamas judėti.

Nuokrypis, greitis ir pagreitis

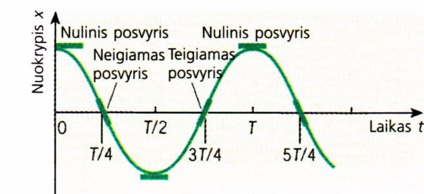
Jūs jau susidūrėte su sąryšiu tarp nueito kelio, greičio ir pagreičio (žr. 2 skyrių). Vykstant harmoniniams svyravimams nuokrypis kinta laike sinuso dėsniu, o tai kur kas sudėtingiau nei būtų tuo atveju, jei jis nuo laiko priklausytų tiesiškai.

6.7 pav. atvaizduotas osciliatoriaus nuokrypis, kintantis laike sinuso dėsniu. Jis atidėtas taip, kad maksimalus nuokrypis atitiktų laiko momentą $t = 0$. Tada $x = A\cos\omega t = A$. Osciliatoriaus greitis bet kuriuo laiko momentu aprašomas mažu nuokrypio pokyčiu Δx, nueinamu per trumpą laiko tarpsnį Δt:

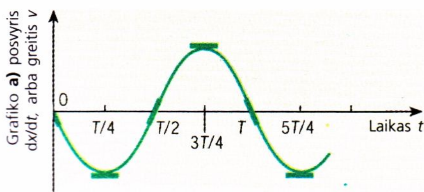
$$\textbf{Greitis} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

?

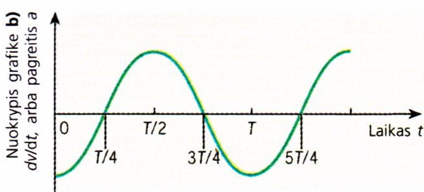
C Taškai popieriaus juostelėje 6.6 paveiksle yra nutolę nevienodais atstumais. Išsamiai paaiškinkite, kodėl taip yra.



a) Nuokrypio priklausomybė nuo laiko



b) Greičio priklausomybė nuo laiko



c) Pagreičio priklausomybė nuo laiko

6.7 pav. **Harmoninio svyravimo kreivės**

Greitį atitinka nuokrypio kreivės (6.7 pav.) posvyris bet kuriame taške. Matome, kad:

- Kai $t = 0$, posvyris lygus nuliui.
- Kai $t = T/4$, posvyris yra neigiamas ir pasiekia maksimalią neigiamą vertę.
- Kai $t = T/2$, posvyris vėl lygus nuliui.
- Kai $t = 3T/4$, posvyris pasiekia maksimalią teigiamą vertę.
- Kai $t = T$, osciliatorius grįžta į pradinę padėtį, o kreivės posvyris yra lygus nuliui.

Posvyrio vertes galime visame šiame ruože atvaizduoti grafiškai. Taip gausime greičio priklausomybės nuo laiko kreivę, parodytą 6.7b) paveiksle. Šios kreivės forma yra panaši į atvaizduotos 6.7a) paveiksle, tik pastumta išilgai laiko ašies. Pradiniu laiko momentu $t = 0$ greitis lygus nuliui. Tai aprašoma funkcija $\sin \omega t$, kadangi greitis pradeda didėti neigiama kryptimi, priklausomybė bus $-\sin \omega t$. Greitis *atsilieka* nuo nuokrypio dydžiu $\pi/2$. Sakome, kad jo fazė nesutampa dydžiu $-\pi/2$. Fazę nagrinėsime 129 puslapyje.

Dabar imkime greičio priklausomybės nuo laiko grafiką ir taip pat panagrinėkime polinkį dv/dt. Gausime pagreičio kitimą laike (žr. 6.7c) pav.). Matome, kad pagreičio fazė yra priešinga nuokrypio fazei, t. y. jų fazės nesutampa dydžiu π. Todėl, kai vienas pasiekia maksimalią teigiamą vertę, antrasis įgauna maksimalią neigiamą vertę, ir taip toliau. Pagreitį galime aprašyti funkcija $-\cos \omega t$.

Už šių kreivių slypinti fizika

Ar šios kreivės turi prasmę? Matome, kad greitis yra maksimalus, kai nuokrypis lygus nuliui. Pagalvokite apie švytuoklę. Didžiausias jos judėjimo greitis yra trajektorijos viduryje. O kaip su dviem spyruoklėmis pritvirtintu vežimėliu? Jis irgi sparčiausiai juda savo vidurinėje padėtyje. Kita vertus, abiem atvejais greitis lygus nuliui, kai nuokrypis maksimalus. Švytuoklė ir vežimėlis nejuda tuo momentu, kai pakinta jų judėjimo kryptis. Tačiau jėga tuo momentu yra maksimali, tad ir pagreitis turi būti maksimalus. Kadangi jėga grąžina švytuoklę ar vežimėlį į pusiausvirą padėtį trajektorijos viduryje, tai pagreitis turi būti neigiamas nuokrypio atžvilgiu. Centrinėje padėtyje horizontalia kryptimi švytuoklės neveikia jokia jėga. Vežimėlio atveju jėgos, kuriomis horizontalia kryptimi veikia abi spyruoklės, visiškai kompensuoja viena kitą.

Įrodymas panaudojant diferencijavimą

Sąryšius greičiui ir pagreičiui galime gauti ir diferencijavimo būdu. Nuokrypis aprašomas taip:

$$x = A\cos\omega t$$

Greitį v rasime išdiferencijavę:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(A\cos\omega t) = -A\omega\sin\omega t$$

Kad rastume pagreitį a, diferencijuojame dar kartą:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(-A\omega\sin\omega t) = -a\omega^2\cos\omega t$$

Tačiau dydį $A\cos\omega t$ galime pakeisti dydžiu x:

$$a = -\omega^2 x$$

Kas gi yra paprastasis harmoninis svyravimas?

Paprastasis harmoninis svyravimas – tai toks judėjimas, kurio metu pagreitis yra tiesiog proporcingas nuokrypiui nuo tam tikro taško ir jo kryptis yra į tą tašką.

Tiek vaizduojant grafiškai, tiek ir diferencijuojant matyti, kad nuokrypis laike kinta sinuso dėsniu, o pagreitis yra proporcingas nuokrypiui. Pagreitis nukreiptas priešinga kryptimi, ir tai atspindi neigiamas ženklas.

Įrodymas, kad švytuoklės judėjimas yra paprastasis harmoninis svyravimas

Įrodysime, kad pasvaro pagreitis yra proporcingas jo nuokrypiui nuo judėjimo vidurinės (vertikalios) padėties.

Tarkime, švytuoklės masė yra m. Sunkio jėga mg veiks pasvarą vertikaliai žemyn. Yra dar įtempimo jėga T, veikianti pakaboje. Kai pasvaras sudaro su vertikale kampą θ, įtempimas veikia pakabą kampu θ vertikalės atžvilgiu (6.8 pav.). Išskaidykime jėgas išilgai pakabos ir jai statmena kryptimi. Išilgai pakabos

$$T = mg\cos\theta$$

Įtempimo pakaboje jėga turi būti lygi, bet priešingos krypties sunkio jėgos *dedamajai pakabos kryptimi*.

Statmenai pakabai veikia *nesukompensuota* jėga $mg\sin\theta$. Ši masės m pasvarą veikianti jėga turi suteikti jam pagreitį a kampo mažėjimo kryptimi (t. y. ji veikia priešinga nuokrypiui kryptimi). Taigi galime teigti, kad

$$mg\sin\theta = -ma$$

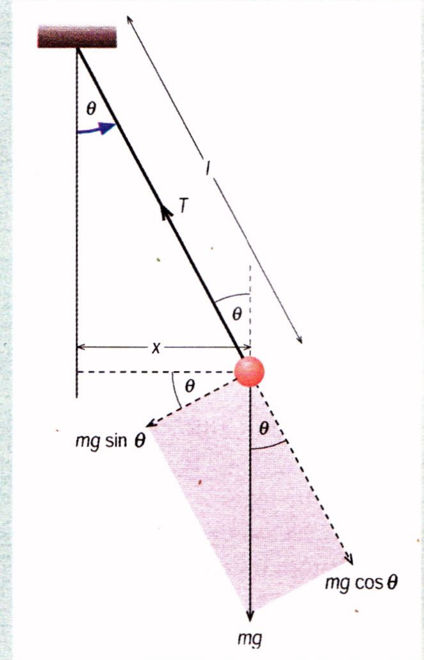
arba

$$g\sin\theta = -a$$

Jei θ yra labai mažas ir išreikštas radianais, tai $\sin\theta \approx \theta$, ir gauname:

$$g\theta = -a$$

Taigi pagreitis yra proporcingas kampiniam nuokrypiui θ.



6.8 pav. Matematinės švytuoklės periodo formulės išvedimui

Matematinės švytuoklės periodas

Tarkime, x yra švytuoklės nuokrypis nuo vertikalės horizontalia kryptimi, o l – švytuoklės ilgis. Tada esant mažam θ:

$$\theta = \frac{x}{l}$$

Iš ankstesnio skirsnio žinome, kad $g\theta = -a$. Todėl

$$\frac{gx}{l} = -a$$

$$a = -\left(\frac{g}{l}\right)x \qquad (1)$$

Pagal harmoninio svyravimo apibrėžimą pagreitis proporcingas kampiniam nuokrypiui θ. Lygtį (1) palyginame su gautąja paprastojo harmoninio svyravimo lygtimi 118 puslapyje:

$$a = -\omega^2 x,$$

iš kur

$$\omega^2 = \frac{g}{l}$$

Kadangi $\omega = 2\pi f$, $4\pi^2 f^2 = \frac{g}{l}$,

iš kur

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$

Švytuoklės periodas $T = 1/f$, todėl

$$\boldsymbol{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}$$

Įsidėmėkite, kad ši išraiška yra teisinga tik tada, kai θ yra mažas (mažesnis nei maždaug 10°, kas atitinka mažiau nei 0,2 radianų).

D Laikrodžio švytuoklės periodą nesunku paderinti uždėjus ant jos pasvaro tam tikros masės svarmenis, tarkime, monetas ant Didžiojo Beno (Londone) švytuoklės. Kodėl?

E Apskaičiuokite 1,20 m ilgio švytuoklės, pakabintos tam tikrame taške, svyravimų periodą. Kaip manote, ar jis pasikeis (ir jei taip, tai ar padidės, ar sumažės), jei švytuoklė bus:

a) pakabinta Mėnulio paviršiuje,

b) pakabinta kylančiame į viršų lifte.

Ant spyruoklės pakabinto kūno svyravimų periodas

Spyruoklė veikia jėga

$$F = -kx,$$

kur x yra spyruoklės pailgėjimas arba sutrumpėjimas pusiausvirojo ilgio atžvilgiu, k – spyruoklės konstanta. Masės m kūną pakabinus ant spyruoklės, ji ištįsta dydžiu x_0, kurį nusako sąryšis $kx_0 = mg$ (žr. 6.9b) pav.).

Jei kūną patrauksime dar žemyn atstumu x ir paleisime, kaip parodyta dalyje (6.9c) pav.), tai jį veiks šios jėgos:

- kūno sunkio sukelta žemyn veikianti jėga mg,
- dėl ištemptos spyruoklės tamprumo į viršų veikianti jėga, lygi $k(x + x_0)$.

Jos nėra lygios, todėl pakabintą kūną veikia atstojamoji jėga ir suteikia jam pagreitį a. Kadangi jėga yra lygi masės ir pagreičio sandaugai, tai sutarus, kad žemyn veikianti jėga yra teigiama, o aukštyn – neigiama, gaunama:

$$\underbrace{-k(x + x_0)}_{\text{spyruoklės įtempimo jėga}} + \underbrace{mg}_{\text{sunkio jėga}} = \underbrace{ma}_{\text{pagreitį suteikianti atstojamoji jėga}}$$

Kadangi aukštyn veikianti jėga $k(x + x_0)$ yra didesnė už žemyn veikiančią sunkio jėgą mg, pagreitis yra nukreiptas aukštyn, taigi yra neigiamas. Lygtis tebegalioja, kai spyruoklė susitraukia iki savo pusiausvirojo ilgio.

Dabar, pasinaudoję Huko dėsniu, lygtyje galime pakeisti mg dydžiu kx_0. Gausime:

$$-k(x + x_0) + kx_0 = ma$$

Todėl:

$$-kx = ma$$

$$a = -\frac{k}{m}x$$

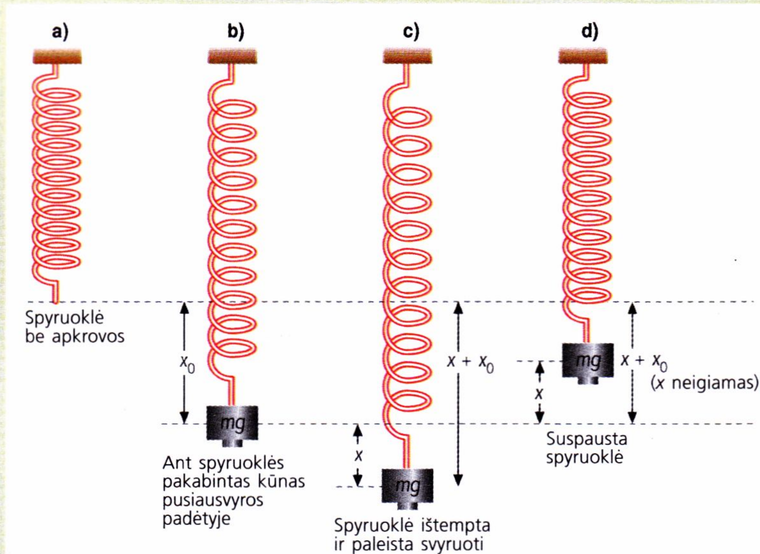
Tai palyginame su paprastojo harmoninio svyravimo lygtimi:

$$a = -\omega^2 x$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

Remiantis šia lygtimi, ant spyruoklės pakabinto kūno svyravimų periodas

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$



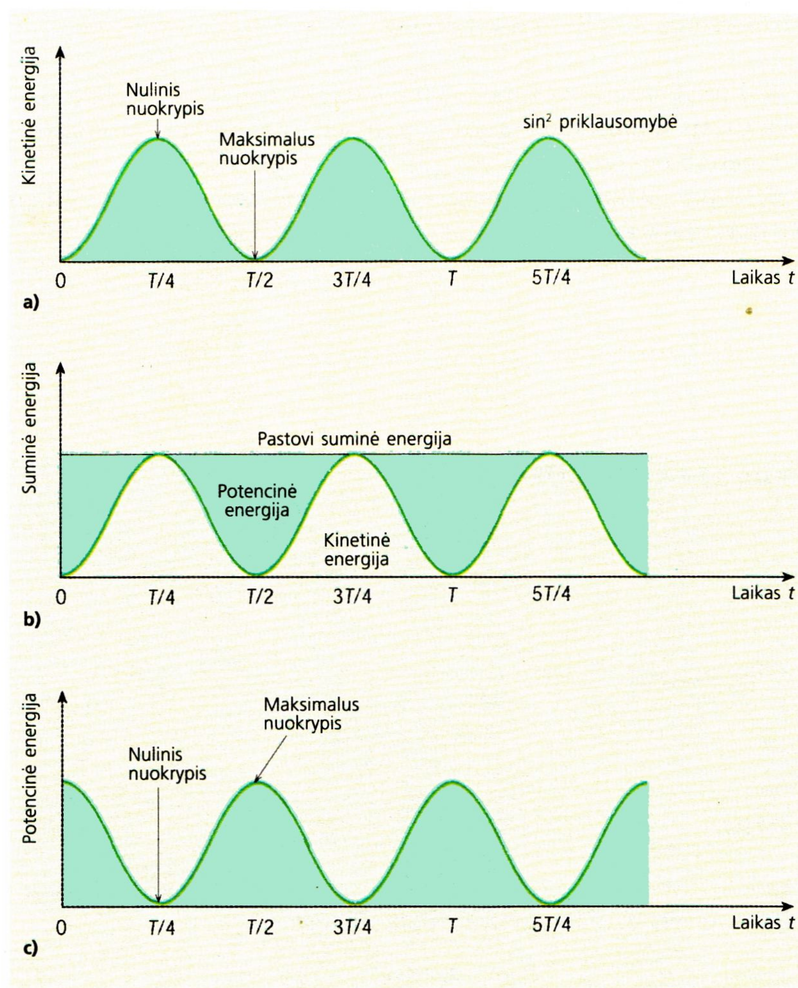
6.9 pav. Ant spyruoklės pakabinto kūno svyravimų periodo formulės išvedimui

2 ENERGIJOS POKYČIAI SVYRUOJANČIOJE SISTEMOJE

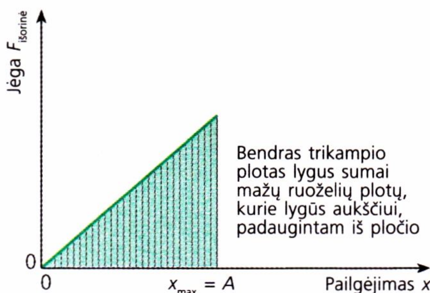
Visuose nagrinėtuose harmoninių svyravimų pavyzdžiuose (švytuoklė, ant spyruoklės pakabintas kūnas, apie tam tikrą tašką svyruojantis laboratorinis vežimėlis) svyruojančio m masės kūno greitis v kinta nuo maksimalios vertės, kurią įgyja praeidamas pusiausvyros padėtį, iki nulio, kai nuokrypis pasiekia didžiausią vertę ir judėjimo kryptis keičiasi. Bet kuriai sistemai kinetinė energija bet kuriuo laiko momentu yra lygi $\frac{1}{2}mv^2$. Dabar panagrinėkime, kaip kinta ši energija.

Energijos priklausomybės nuo laiko kreivės

Kadangi v kinta laike sinuso dėsniu (žr. 6.7 pav.), kinetinės energijos kitimą laikui bėgant galima atvaizduoti imant greičio kvadratą (6.10 pav.). Bendra svyruojančios sistemos energija turi išlikti pastovi. Todėl didėjant ir mažėjant kinetinei energijai, ji perduodama iš kitos energijos formos ir vėl grąžinama. Toji kita energijos forma turi būti potencinė energija. Ją galime atvaizduoti skirtumu tarp pastovios energijos vertės ir kinetinės energijos (užtamsintas plotas 6.10b) pav.). Galime potencinę energiją atvaizduoti ir kitaip – teigiama kryptimi, kaip ir kinetinę energiją (žr. 6.10c) pav.). Tada jos fazė skiriasi nuo kinetinės energijos fazės ketvirčiu periodo.

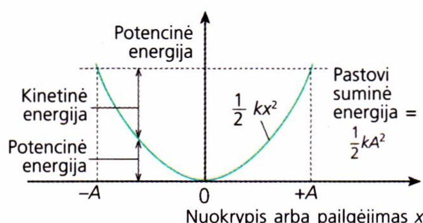


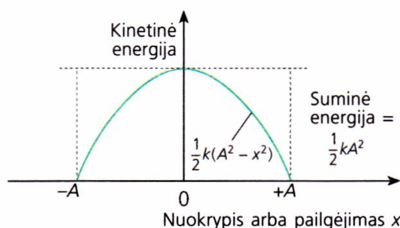
6.10 pav. **Harmoninio osciliatoriaus** a) **kinetinės energijos,** b) **suminės energijos ir** c) **potencinės energijos kitimas laike**



6.11 pav. Šiame grafike pavaizduota, kaip turi padidėti išorinė jėga, kad ištemptų spyruoklę. Maksimalus pailgėjimas = $x_{max} = A$

6.12 pav. **Osciliatoriaus potencinės ir kinetinės energijos priklausomybė nuo nuokrypio x**





Žr. 1–6 klausimus.

Energijos priklausomybės nuo nuokrypio kreivės

Galime atvaizduoti kinetinės ir potencinės energijos priklausomybes ne nuo laiko t, o nuo nuokrypio x. Tada gausime visai kitokias kreives. Norint išsiaiškinti šių kreivių formą, patogiausia pradėti nuo potencinės energijos indėlio į energiją.

Kaip ir anksčiau, panagrinėkime kūną, horizontaliai pritvirtintą dviem spyruoklėmis. (Tokiu atveju mums nereikės atsižvelgti į gravitacinę potencinę energiją.) Tarkime, kad abiejų kūną veikiančių spyruoklių jėgos konstanta yra lygi k. Vežimėliui pastumti iš pusiausviros padėties ties $x = 0$ iki nepusiausviros padėties x reikalinga išorinė jėga $F_{išorinė}$, kurią galima išreikšti taip:

$$F_{išorinė} = kx$$

Ši išorinė jėga lygi spyruoklės tamprumo jėgai, bet yra priešingos krypties. Atliktas darbas = jėga × kelias ir yra lygus trikampio po išorinės jėgos grafiku plotui (6.11 pav.):

$$\text{atliktas darbas} = \tfrac{1}{2}F_{išorinė}\,x_{max} = \tfrac{1}{2}kx^2_{max}.$$

Tačiau x_{max} yra maksimalus nuokrypis arba svyravimų amplitudė. Anksčiau ją žymėjome A. Todėl

$$\text{atliktas darbas} = \tfrac{1}{2}kA^2$$

Tai ir yra spyruoklėse sukaupta potencinė energija.

Esant maksimaliam nuokrypiui, kinetinė energija lygi nuliui, o tai reiškia, kad $\frac{1}{2}kA^2$ yra lygi suminei svyruojančios sistemos energijai. Vadinasi, svyruojančios sistemos suminė energija yra proporcinga amplitudės kvadratui:

$$E_{suminė} \sim A^2$$

Kai nuokrypis $x < A$, potencinė energija lygi $\frac{1}{2}kx^2$. Paėmę skirtumą tarp suminės energijos ir potencinės energijos, gauname:

$$\text{kinetinė energija } E_K = E_{suminė} - \tfrac{1}{2}kx^2 = \tfrac{1}{2}k(A^2 - x^2)$$

6.12 pav. atvaizduotas potencinės ir kinetinės energijos kitimas kintant nuokrypiui.

Kita greičio išraiška

$$E_K = \frac{1}{2}k(A^2 - x^2)$$
$$= \frac{1}{2}mv^2$$

Taigi $mv^2 = k(A^2 - x^2)$, iš kur

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)}$$

Tačiau $$\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega,$$

kadangi $\omega^2 = k/m$ (žr. papildomos informacijos sritį 120 psl.). Iš čia greitį galime išreikšti tokia forma:

$$v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$$

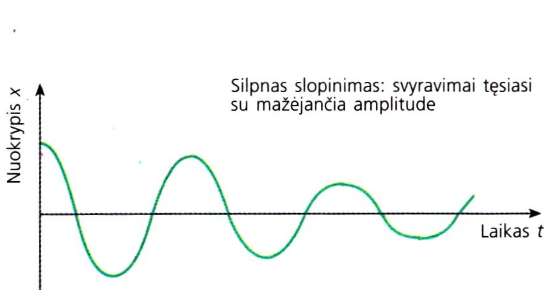
3 SLOPINIMAS

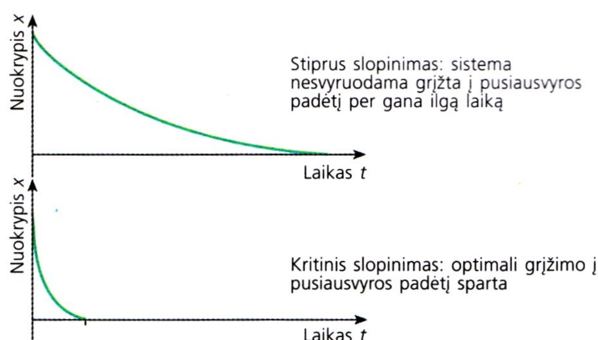
Iki šiol darėme prielaidą, kad mūsų svyruojančių sistemų neveikia trintis. Tačiau iš tikrųjų taip niekada nebūna – trintis visada bent kiek veikia, ir dėl to sistema netenka energijos.

Suminė svyruojančiosios sistemos energija priklauso nuo svyravimų amplitudės. Jei sistema netenka energijos, svyravimų amplitudė mažėja. Kokia sparta tai vyksta, priklauso nuo trinties dydžio, kuris nulemia vadinamąjį **slopinimą.**

Slopinimas, kuris sukelia svyravimų amplitudės mažėjimą, dažnai esti naudingas (6.13 pav.). Jei *slopinimas silpnas*, svyravimų amplitudė palaipsniui mažėja, ir jie išnyksta tik po ilgo laiko. Jei *slopinimas labai stiprus*, sistema net nesvyruoja, tik labai lėtai grįžta į savo pusiausvirą padėtį. Esant *kritiniam slopinimui*, trinties dydis kaip tik toks, kokio reikia, kad sistema grįžtų į pusiausvyrą per patį trumpiausią laiką ir nenukryptų į priešingą pusę. Šio proceso trukmė apytiksliai lygi laisvųjų sistemos svyravimų periodo ketvirčiui.

?
F Pateikite daugiau slopinimo pasireiškimo praktinių pavyzdžių.



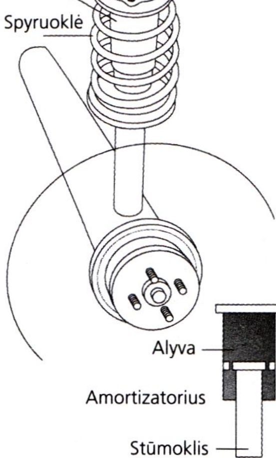


6.13 pav. **Slopinimo poveikis svyruojančiai sistemai**

KAIP SUMAŽINTI KRATYMĄ VAŽIUOJANT DUOBĖTU KELIU

VAŽIUOJANČIO AUTOMOBILIO svyravimams slopinti jo pakabose įmontuojamos spyruoklės ir amortizatoriai. Amortizatoriai sudaryti iš stūmoklių, klampiame skystyje (dažniausiai alyvoje) judančių aukštyn ir žemyn. Be amortizatorių spyruoklės automobilį sūpuotų ilgiau.

Slopinimo efektyvumas priklauso nuo spyruoklės ir amortizatoriaus matmenų bei medžiagų, iš kurių jie padaryti. Slopinimas automobilių pakabose turi būti šiek tiek mažesnis už kritinį. Jei slopinimas per stiprus, tai automobiliui krestelėjus ir sistemai nukrypus nuo pusiausvyros, ji nespės laiku sugrįžti į pusiausvyros padėtį, kad galėtų nuslopinti kitą krestelėjimą. Jei slopinimas per mažas, tai kol sistema grįš į pradinę padėtį, keleiviai patirs keletą svyravimų. Kai amortizatoriai susidėvi, važiuojant krato stipriau, ir kelionė teikia nepatogumo.



6.14a) **Automobilio pakaba**

6.14b) **Raliui pritaikytas automobilis: pakaba sušvelnina važiavimą nelygiu keliu**





6.15 pav. **Sūpynėse supanti vaiką mama stengiasi neįsūpuoti iki pavojingos amplitudės**

4 PRIVERSTINIAI SVYRAVIMAI IR REZONANSAS

Jei svyruojančioji sistema praranda energiją, tai galima tą energiją atstatyti ar net padidinti, sistemą veikiant periodine jėga, nukreipta reikiama kryptimi. Jei išorinės jėgos dažnis yra lygus savajam sistemos dažniui, tai svyravimų amplitudė išauga.

Sakykime, jūs sūpynėse supate vaiką (6.15 pav.). Turite būti atsargūs ir nestumti sūpynių per smarkiai ir per tankiai, nes amplitudė gali pasidaryti per didelė, ir vaikas gali iškristi.

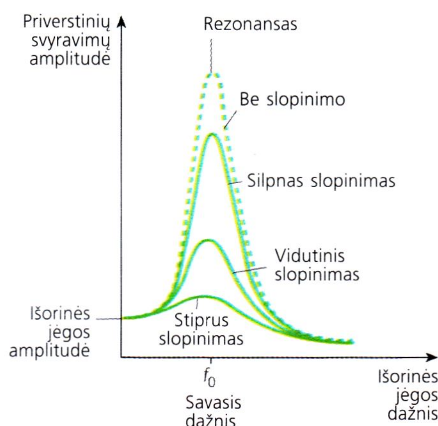
Dažnai reikia slopinti svyravimus, kylančius mechaninėse sistemose. Jei išorinė jėga periodiškai kinta tuo pačiu dažniu kaip ir sistemos savasis dažnis, sakome, kad vyksta **rezonansas.** Tuo metu jėga perduoda sistemai didelį energijos kiekį. (Galbūt kada nors pajutote stiprią vibraciją, jūsų automobiliui atsidūrus greta didelės transporto priemonės su galingu veikiančiu varikliu.)

Stipraus vėjo įsiūbuoti Takomos sąsiaurio tilto svyravimai sukėlė jo avariją (6.17 pav.), įspūdingai pademonstruodami rezonanso reiškinį. Tilto svyravimų amplitudė vis augo ir augo, kol tiltas sulūžo.

Tiltu žygiuojantys kareiviai gali sukelti rezonansą. 1850 metais 200 kareivių žuvo žygiuodami koja kojon *Angers* tiltu Prancūzijoje, kai dėl rezonanso tarp jų žingsnių dažnio ir tilto savojo dažnio tiltas sugriuvo. Kad išvengtų rezonanso, kareiviai per tiltą eina ne koja kojon.

Automobilyje pajuntate nemalonų drebėjimą, kai esant tam tikram greičiui susidaro rezonansas variklyje ar pačiame automobilyje. Susidarius rezonansui turbinoje arba reaktyviniame variklyje, jie gali sulūžti. Taigi matome, kaip svarbu išvengti rezonanso statiniuose ir transporto priemonėse.

Slopinimas stabdo amplitudės augimą. 6.16 pav. parodyta, kaip sistemos svyravimų amplitudė priklauso nuo išorinės jėgos dažnio, ir pailiustruota, kaip rezonansines kreives veikia slopinimas. Kai išorinės jėgos dažnis prilygsta jos veikiamos svyruojančios sistemos savajam dažniui, svyravimai suintensyvėja ir gali pasidaryti visiškai nevaldomi.



6.16 pav. **Rezonansinės kreivės priverstinai svyruojančiai sistemai, kurios savasis dažnis f_0**



6.17 pav. **Takomos sąsiaurio tiltas, per savo trumpą amžių gavęs Šuoliuojančio Gerčio vardą, nes labai svyruodavo vėjyje. Jam sugriauti pakako tik 42 mylių per valandą vėjo. (Laikraščio reporteriui, kuriam priklausė čia matomas automobilis, pavyko nusiropšti.)**

Surištosios švytuoklės

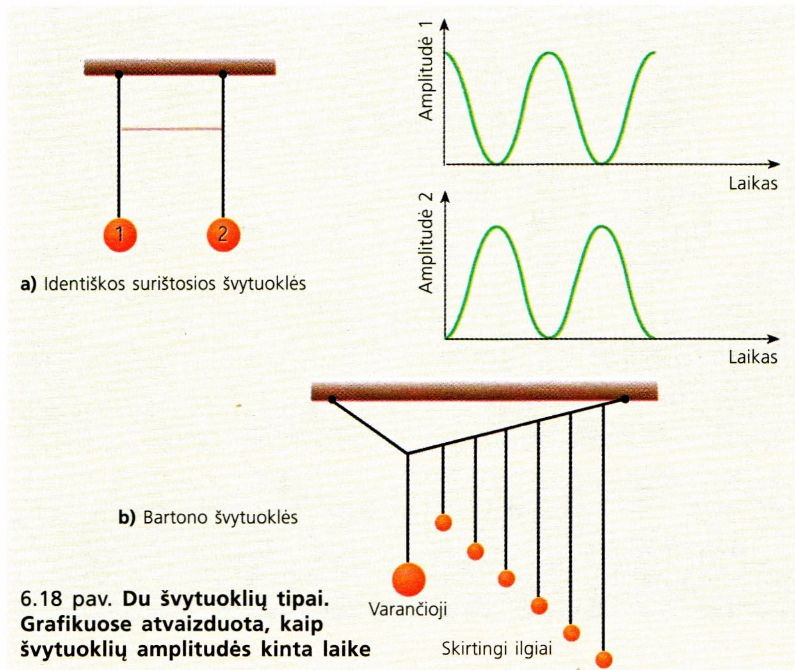
Jei du vienodi osciliatoriai gali sąveikauti, tai jie gali vienas kitam perduoti energiją, kaip kad *Angers* tiltu žygiuojantys kareiviai perdavė energiją tiltui ir pasirašė sau nuosprendį.

Dvi vienodo ilgio švytuoklės gali būti pakabintos ant to paties skersinio ir paleistos svyruoti, kaip parodyta 6.18a) pav. Pravartu švytuokles silpnai surišti tarpusavyje, nors dažnai pakankamai energijos perduodama ir per patį skersinį. Kai pirmoji švytuoklė paleidžiama svyruoti, jos energija palaipsniui pereina antrajai švytuoklei, kol pirmoji visai sustoja. Tuo metu antroji švytuoklė būna įgijusi maksimalią amplitudę ir ima perdavinėti energiją vėl pirmajai, ir taip toliau.

Šios demonstracijos atmaina yra vadinamosios Bartono (*Barton*) švytuoklės, sukabintos ant vienos virvutės (žr. 6.18b) pav.). Viena iš švytuoklių yra masyvesnė (varančioji), o kitų švytuoklių pasvarai yra vienodi ir jų masės mažesnės nei varančiõsios. Švytuoklių ilgiai nevienodi, ir vienos iš jų ilgis sutampa su varančiosios švytuoklės ilgiu. Būtent ši švytuoklė pradeda svyruoti didžiausia amplitude.

?

G Kodėl varančiosios švytuoklės pasvaras turi būti didesnis?

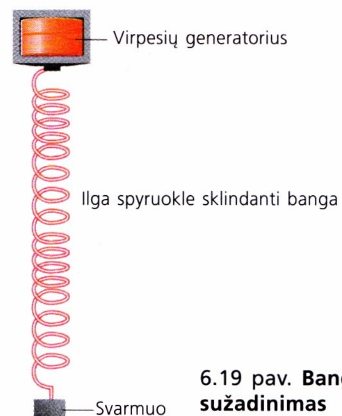


6.18 pav. **Du švytuoklių tipai. Grafikuose atvaizduota, kaip švytuoklių amplitudės kinta laike**

5 SVYRAVIMAI IR BANGOS

Jau žinome, kad svyravimai yra periodinis judėjimas. Bangos taip pat periodinės. Svyravimai ir bangos, aišku, tarpusavyje susiję. Iš tikrųjų svyruojantis osciliatorius gali būti panaudotas sukelti bangoms mechaninėje sistemoje (6.19 pav.). Kai bangos sužadintos, jos sklinda spyruokle ar kita aplinka didelius atstumus, kol jų energija palaipsniui išsisklaido.

Egzistuoja skirtingos bangų rūšys. Kai kurioms bangoms sklisti reikalinga medžiaga. Tokios bangos vadinamos **mechaninėmis bangomis.** Medžiagoje sklindančios tokios bangos sukelia dalelių postūmius. Mechaninių bangų pavyzdys gali būti Žemėje sklindančios seisminės bangos, vandens bangos tvenkinių ar vandenynų pa-



6.19 pav. **Bangų sužadinimas vibruojančia sistema**

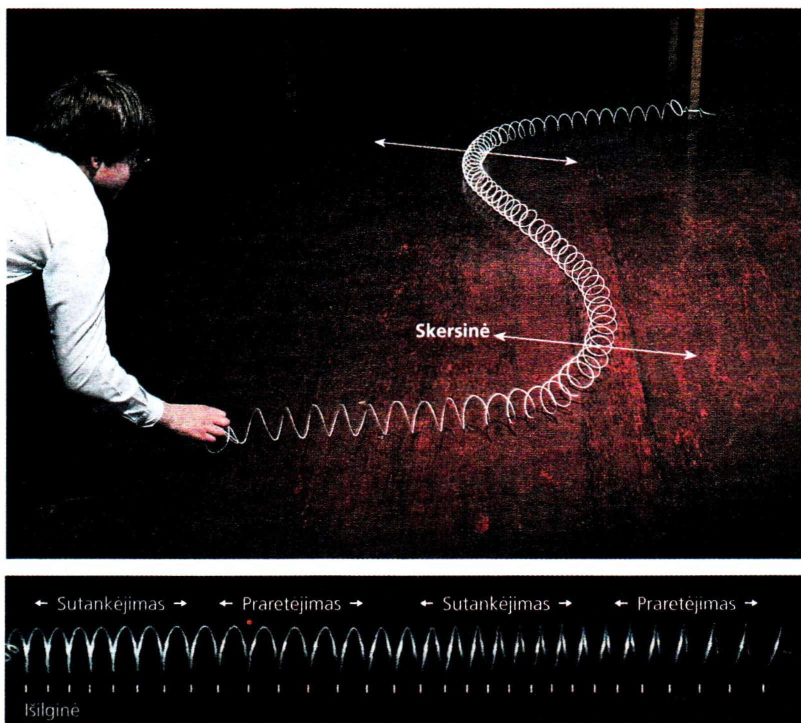
viršiuje, garso bangos ore. Seismines bangas dažniausiai sukelia Žemės drebėjimai, tačiau gali sukelti ir branduoliniai sprogimai.

Jų sklidimo greitis priklauso nuo terpės ir bangų rūšies.

Egzistuoja ir kito tipo bangos, vadinamos **elektromagnetinėmis bangomis,** kurių sklidimui nebūtina medžiaginė terpė. Šias bangas aptarsime 2-oje d. (16 skyriuje).

Skersinės ir išilginės bangos

Mechanines bangas galime skirstyti į **skersines** ir **išilgines** pagal tai, kaip jos sklinda (6.20 pav.). Abi bangų rūšis galima pademonstruoti naudojant ilgą plieninę spyruoklę. Banga yra skersinė, jei sklindant jai išilgai spyruoklės, vijos juda *statmena* kryptimi. Norint sukelti skersines bangas, ilga spyruoklė patiesiama ant plokščio paviršiaus, ir vienas jos galas vinguriuojamas, taip sukeliant svyravimus ir sklindančią bangą.



6.20 pav. **Skersinės ir išilginės bangos ilgoje plieninėje spyruoklėje**

Spyruoklės galą galima judinti ir kitaip – timpčioti pirmyn bei atgal išilgai jos ašies. Spyruoklėje atsiranda **sutankėjimai,** o greta jų – **praretėjimai,** kur vijos prasiskiria. Tada vijų postūmis vyksta išilgai spyruoklės ašies.

Bėgančiosios ir stovinčiosios bangos

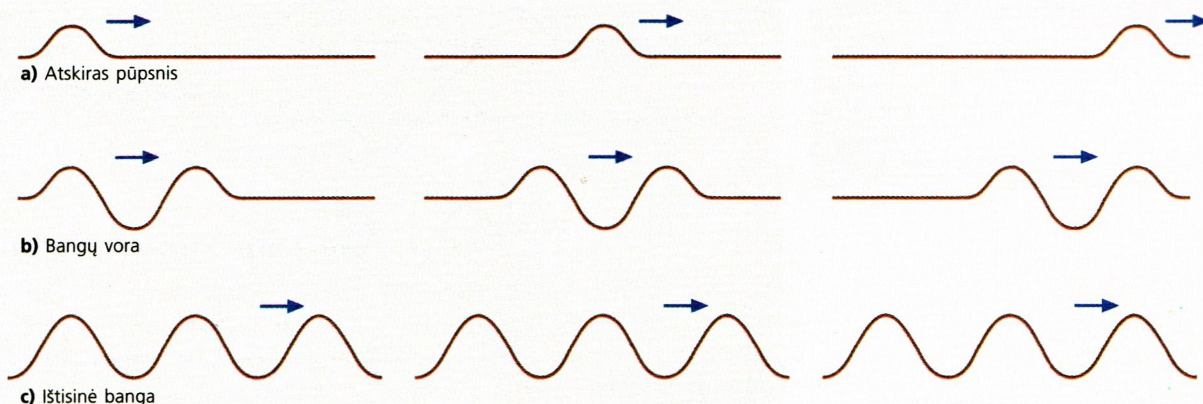
Kai ilgoje plieninėje spyruoklėje sužadiname bangas, tiek skersines, tiek ir išilgines, matome, kad jos juda iš vieno galo į kitą. Kadangi tokios bangos spyruokle sklinda, jos vadinamos **bėgančiosiomis** bangomis. Tačiau jei antras spyruoklės galas yra įtvirtintas, banga atsispindi atgal. Atsispindėjusioji banga gali sąveikauti su pirmyn sklindančia banga. Esant tam tikram dažnių ir greičių deriniui, šios priešingomis kryptimis sklindančios bangos gali sudaryti **stovinčiąją (stacionarią)** bangą. Šiame skyriuje panagrinėsime abi bangų rūšis.

6 BĖGANČIŲJŲ BANGŲ SUŽADINIMAS

Bendru atveju sužadintoji banga sklinda taip pat kaip raibuliai vandens paviršiumi, į tvenkinį įmetus akmenuką. Skersinių ir išilginių bangų sklidimas išsamiai nagrinėjamas 16 skyriuje. Čia apsiribosime tiesinėmis bangomis, sužadintomis kokioje nors ilgoje plieninėje spyruoklėje, stygoje ar vargonų vamzdyje.

Skersines bangas lengviau atvaizduoti, todėl panagrinėkime skersines bangas, sukeltas ištemptoje virvutėje. Pasistengę galime sukelti virvutėje atskirą pūpsnį ir stebėti, kaip jis juda (žr. 6.21a) pav.). Nors pūpsnis išlaiko savo formą, jo amplitudė sklindant virvute veikiausiai mažės. Toks pūpsnis gali sklisti gana didelį nuotolį.

Galime sužadinti ir keleto bangų seką. Ji taip pat sklis virvute ir išlaikys savo formą (žr. 6.21b) pav.). Be to, nuolat judindami vieną virvutės galą, galime sukelti ištisinę bangą, sklindančią išilgai visos virvutės (6.21c) pav.).



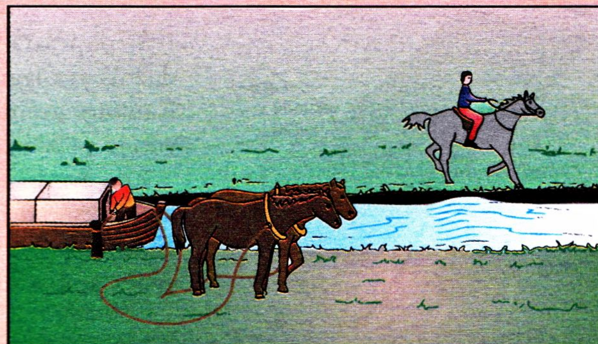
6.21 pav. **Skersinės bangos, sklindančios įtempta virvute**

VALTIS SUKELIA SOLITONĄ

PAVIENIAM PŪPSNIUI buvo duotas **solitono** vardas. Solitoną nelengva sukelti virvutėje, tačiau jo sklidimas optinėmis skaidulomis yra svarbus optiniuose ryšiuose.

1834 metais Džonas Skotas-Raselas (*John Scott-Russell*) jodinėdamas palei *Forth–Clyde* kanalą, pastebėjo didelį solitoną ir jį taip aprašė.

„Aš kaip tik stebėjau, kaip juda valtis, kurią siauru kanalu sparčiai tempė pora arklių, kai ji staiga sustojo. Bet vanduo, kurį valtis vertė judėti kanalu, nesustojo. Kunkuliuodamas jis susitvenkė valties priešakyje, paskui staiga atitrūko ir dideliu greičiu nusirito pirmyn sudarydamas didelį vienišą iškilimą – apskritą, glotnų ir ryškiai išsiskiriantį vandens gūbrį, kuris judėjo kanalu pastebimai nekeisdamas savo formos ir nemažindamas greičio. Aš nusivijau jį raitomis ir pavijau vis dar judantį kokių aštuonių ar devynių mylių per valandą greičiu bei išlaikantį savo pradinius kontūrus, apimančius apie trisdešimt pėdų į ilgį ir pėdą ar pusantros į aukštį. Jo aukštis palaipsniui mažėjo, ir po mylios ar dviejų mylių lenktynių aš jį pamečiau kanalo vingiuose. Taigi 1834 metų rugpjūčio mėnesį įvyko mano pirmas atsitiktinis susidūrimas su tuo savotišku ir nuostabiu reiškiniu“.

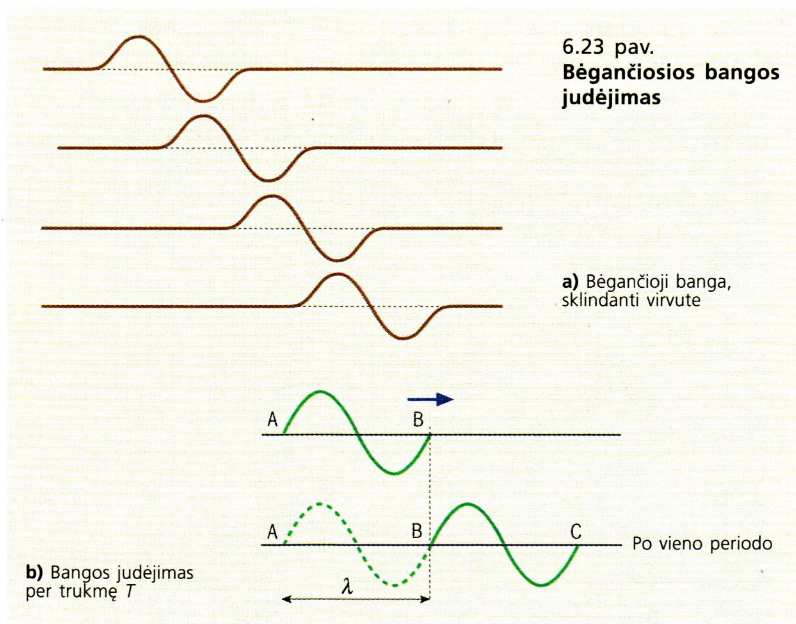


6.22 pav.

Šios bangos turi nemažai ypatumų, į kuriuos verta atkreipti dėmesį. Pirma, pūpsnio, bangų voros ar ištisinės bangos greitis nepriklauso nuo dažnio, kuriuo judinamas virvutės galas, ir taip pat nepriklauso nuo sužadintos bangos amplitudės. Greitis priklauso tik nuo pačios virvutės savybių. Kaip tik dėl to, kad greitis pastovus, ir išlaikoma pūpsnio ar bangos forma.

6.23a) pav. pavaizduota pavienė banga, sklindanti virvute. Tarkime, per trukmę T banga nusklinda atstumą, tiksliai lygų jos ilgiui (žr. 6.23b) pav.). Taigi banga pasistūmėjo vienu bangos ilgiu λ. Bangos greitis lygus nueitam keliui, padalytam iš laiko, todėl

$$v = \frac{\lambda}{T}$$



6.23 pav. Bėgančiosios bangos judėjimas

a) Bėgančioji banga, sklindanti virvute

b) Bangos judėjimas per trukmę T

Žr. 8 klausimą.

H **Banga sklinda virvute 0,60 m · s⁻¹ greičiu. Bangos ilgis 20 cm. Apskaičiuokite bangos dažnį ir periodą.**

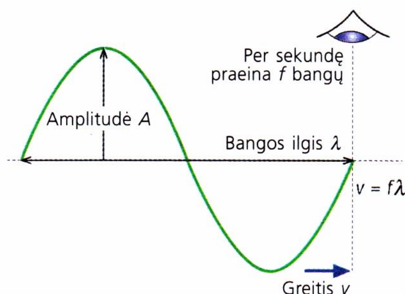
Kadangi T yra tokia judėjimo trukmė, per kurią įvyksta vienas pilnas svyravimas, banga pasislinks iš padėties AB į BC, o gretima banga atsklis į padėtį AB, kaip brėžinyje parodyta brūkšnine linija. T yra svyravimo **periodas.** Svyravimų **dažnis** f aprašomas taip:

$$f = \frac{1}{T}$$

Taigi $$\text{greitis} = \frac{\text{kelias}}{\text{laikas}} = \text{dažnis} \times \text{bangos ilgis}$$

Ši paprasta **bangos formulė** galioja visoms bangoms. Bangos dažnis yra lygus bangą sukėlusių virvutės galo svyravimų dažniui. Kadangi greitis yra virvutės charakteristika, bangos ilgis šioje virvutėje priklausys nuo svyravimų šaltinio dažnio.

Kita svarbi bangos charakteristika – jos amplitudė A, kuri nusako maksimalų bet kurio taško bangoje nuokrypį, t. y. bet kurio virvutės taško nuokrypį nuo nulinio nuokrypio padėties. Šios savybės apibendrintos 6.24 pav.



6.24 pav. **Bangą apibūdinantys dydžiai**

7 BANGOS LYGTIS

Kai virpesių generatoriaus sužadinta bangų vora sklinda virvute, virvutės taškai periodiškai nukrypsta į šalis ir šis nuokrypis aprašomas taip:

$$y = A\sin\omega t, \text{ kur } \omega = 2\pi f$$

Matome, kad y kinta laike, todėl galime užrašyti $y(t)$ taip pažymėdami y priklausomybę nuo t. Atstumą išilgai virvutės žymėkime x. Generatorius yra gale, kur $x = 0$. Todėl galime užrašyti prie generatoriaus pritvirtinto virvutės galo nuokrypį taip:

$$y(0, t) = A\sin\omega t$$

117-ame puslapyje minėjome, kad svyruojančio vežimėlio nuokrypį y galime aprašyti išraiška $A\cos\theta$, kur θ yra kampinis nuokrypis. Tačiau šiuo atveju turime pradėti nuo nulinio nuokrypio, todėl $y = A\sin\theta$. Galime užrašyti:

$$y(0, t) = A\sin\theta$$

Toliau nuo virvutės galo nuokrypis nesutaps su šia išraiška, o nesutapimo dydis priklausys nuo to, kokiu atstumu nuo virvutės galo yra taškas. Tarsi judėjimas vyktų su papildomu kampiniu nuokrypiu, proporcingu atstumui x išilgai virvutės. Įvedę **fazinį kampą** ϕ, gauname:

$$y(x, t) = A\sin(\theta + \phi)$$

Kadangi $\theta = \omega t$, galime perrašyti taip:

$$y(x, t) = A\sin(\omega t + \phi)$$

?

I Svyruojančios virvutės mažos atkarpėlės nuokrypis laiko momentu $t = 0$ yra maksimalus ir lygus 2 cm. Kam lygus kitos virvutės atkarpos nuokrypis, jei jos svyravimų fazė nesutampa 35°?

Fazinio kampo prasmė

Panagrinėkime šešėlį metantį įrenginį, panašų į tą, kuris atvaizduotas 116 psl., tačiau šį kartą su *dviem* rutuliukais, pritvirtintais prie sukamojo stalelio. Abu rutuliukai yra vienodai nutolę nuo centro, o centrinis kampas tarp jų lygus θ. 6.25 pav. atvaizduotame pavyzdyje $\theta = 90°$.

Per rutuliuką A galima nubrėžti tiesę, einančią nuo lempos statmenai į ekraną. Tai reiškia, kad laiko momentu $t = 0$ šio rutuliuko nuokrypis x_A lygus nuliui, t. y. $x_A = 0$, kai $t = 0$.

Dabar panagrinėsime laiko momentą t, kai rutuliukas B atsiduria tiesėje tarp lempos ir ekrano. Rutuliuko A šešėlio nuokrypis dabar yra toks:

$$x_A = A\sin\omega t$$
$$= A\sin(\pi/2)$$

kadangi sukamasis staliukas pasisuko 90° kampu.

Tuo tarpu šešėlio B nuokrypis yra toks:

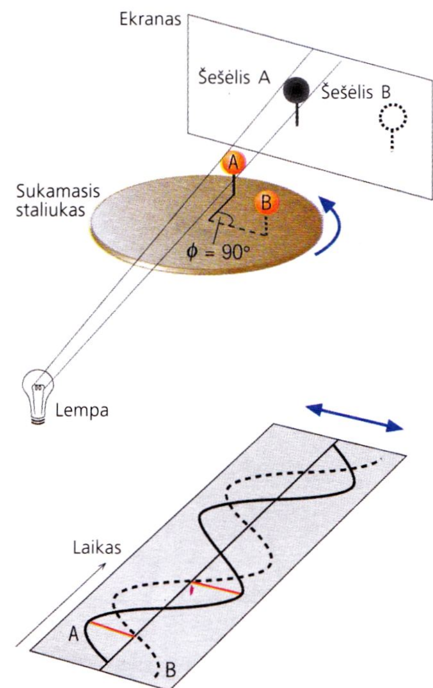
$$x_B = A\sin 0$$

kadangi rutuliukas yra tiksliai tarp lempos ir ekrano. Jei B nuokrypį užrašysime šitokiu pavidalu

$$x_B = A\sin(\omega t + \phi)$$
$$= A\sin(\pi/2 + \phi)$$

tada $\quad 0 = \pi/2 + \phi$ arba $\phi = -\pi/2$

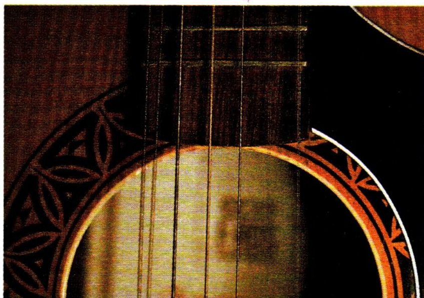
B fazinis kampas – tai kampas, kuriuo, judėdamas aplink sukamąjį staliuką, jis atsilieka nuo A. Rutuliukų A ir B nuokrypiai yra atvaizduoti grafiškai 6.25 paveiksle, kai ϕ lygus $-\pi/2$.



Šešėlių nuokrypiai ekrane
B atsilieka nuo A kampu φ (šiuo atveju 90°)

6.25 pav. **Fazinio kampo demonstravimas**





6.26 pav. a) **Grojimas gitara.** b) **Šioje sparčiąja kamera padarytoje nuotraukoje matyti bosinės ir dviejų viršutinių stygų svyravimai. Mažiausias yra bosinės stygos įtempimas, todėl bangos amplitudė joje yra didžiausia**

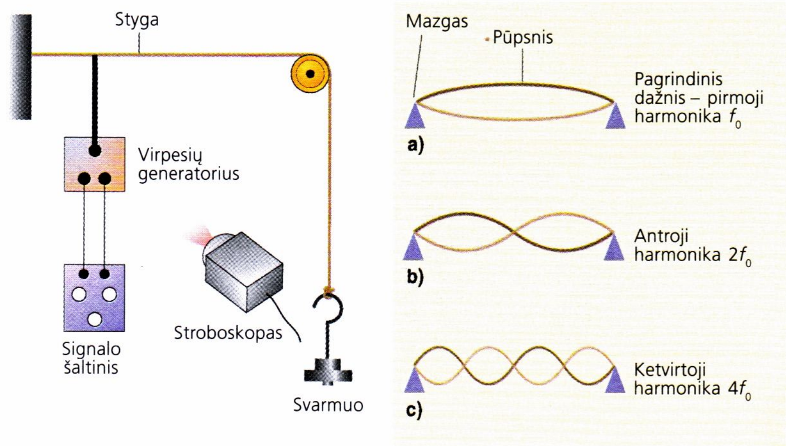
8 STOVINČIŲJŲ BANGŲ GAVIMAS

Stovinčiosios bangos susidaro styginiuose instrumentuose, pavyzdžiui, gitaroje (6.26 pav.). Matome stygas virpant į abi puses. Užgavus stygą, sužadinama bėgančioji skersinė banga, kuri sklinda nuo užgavimo taško. Ji pasiekia įtvirtintą stygos galą ir atsispindi atgal. Susitikus šioms dviems bangoms jų amplitudės sumuojasi.

Stygos abu galai įtvirtinti ir ji savaime svyruoja tam tikru dažniu. Susidėjus dviem tokioms bangoms, nubėgančiajai ir atsispindėjusiajai, stygoje susidaro stovinčioji banga. Stygą užgavus, jos viduryje sužadinama **pagrindinė** moda (bangos iškilumas). Šiuo atveju styga svyruoja taip, kad didžiausias nuokrypis (vadinamasis **pūpsnis**) atsiranda jos viduryje, o, artėjant į stygos galus, nuokrypis mažėja iki nulio (ten susidaro vadinamieji **mazgai**).

Laboratorijoje stovinčiąsias bangas galime panagrinėti naudodamiesi įtempta styga ar ilga gumine juostele. Styga ištempiama nuo nejudamos atramos per skriemulį, ir pakabintas svarmuo laiko ją įtemptą (6.27 pav.). Arti vieno stygos galo prie jos pritvirtintas virpesių generatorius.

Svyravimų dažnis pradedamas keisti nuo mažų verčių ir iš pradžių menkai tepaveikia įtemptą stygą. Dažniui didėjant ir pasiekus tam tikrą vertę, styga pradeda smarkiai svyruoti (žr. 6.27a) pav.). Stygos savasis dažnis tuo metu lygus vibratoriaus dažniui. Šis rezonansinis dažnis yra stygos **pagrindinis dažnis** f_0. Kartais jis vadinamas **pirmąja harmonika.**



6.27 pav. **Stovinčiosios bangos įtemptoje stygoje (arba guminėje juostelėje)**

Toliau didinant vibratoriaus dažnį, stygos svyravimai greitai slopsta. Dar stebime menkus virpesius, kol vibratoriaus dažnis pasiekia reikšmę $2f_0$. Tada stygos gaubtinė (plotas, kurį užkloja virpanti styga) jau kitokia. Joje yra trys mazgai, po vieną galuose ir vienas viduryje (žr. 6.27b) pav.). Tai reiškia, kad susidaro du pūpsniai, nutolę po ketvirtį stygos ilgio nuo abiejų galų. Šių dviejų pūpsnių svyravimo fazės yra skirtingos, jų skirtumas lygus π. Šis svyravimų dažnis yra vadinamas **antrąja harmonika** arba **pirmuoju obertonu.**

Jei dar toliau didinsime dažnį, prieisime kitus rezonansinius dažnius. Sekantis bus $3f_0$, su trimis pūpsniais stygoje ir t. t.



J Stygos savasis svyravimų dažnis lygus 350 Hz. Kokie yra **a)** pirmojo obertono ir **b)** ketvirtosios harmonikos dažniai?

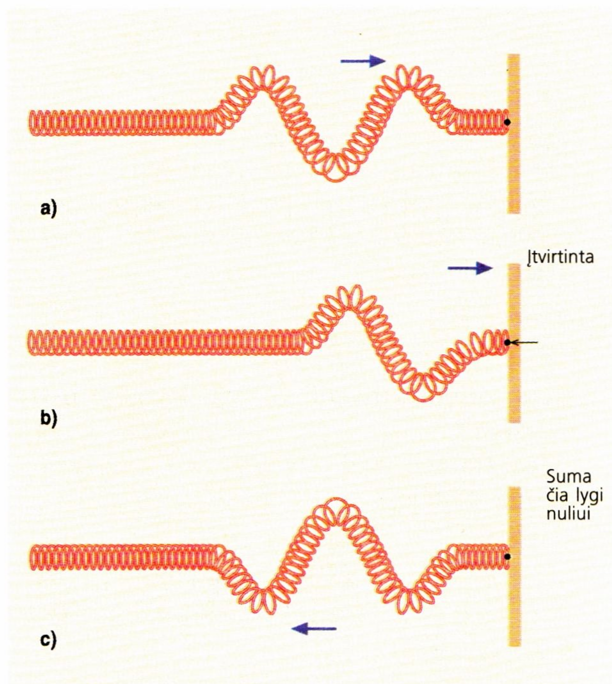
Atspindėtos bangos

Nuodugniau panagrinėkime, kaip sužadinti stovinčiąsias bangas. Sužadinkime trumpą bangą ilgoje plieninėje spyruoklėje, kurios tolimasis galas yra nejudamai pritvirtintas. Tarkime, sužadinta atkarpa apima tik pusantro bangos ilgio, kaip 6.28a) pav. Banga sklis spyruokle, kol pasieks jos tolimąjį galą.

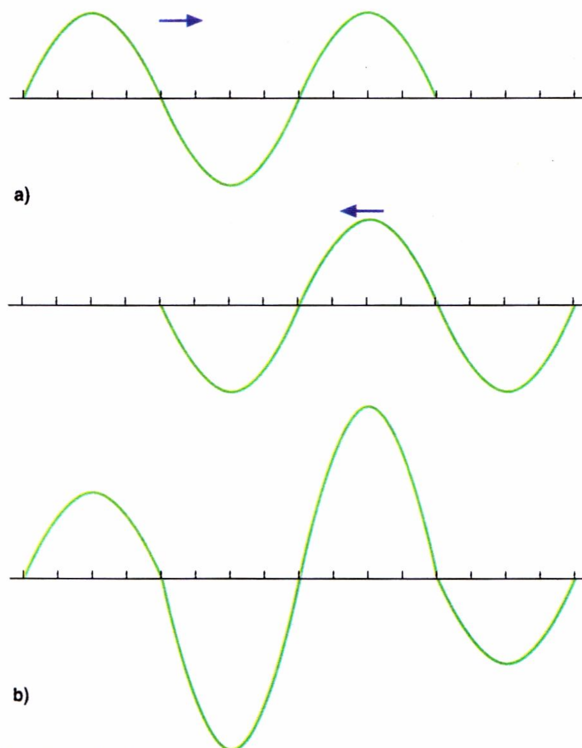
Priėjus šį tašką banga toliau sklisti negali ir atsispindi (žr. 6.28b) pav.). Tai reiškia, kad jos greitis keičia ženklą. Be to, pakinta ir bangos fazė. Jei atsispindėjimo momentu krintančiojoje bangoje nuokrypis buvo nukreiptas į viršų, tai atsispindėjusioje bangoje jis bus nukreiptas žemyn. Tai logiška. Įtvirtintame gale krintančios ir atsispindėjusios bangų nuokrypiai sumuojasi ir gaunamas nulis. Taip ir turi būti, nes tvirtinimo taške nuokrypis visada turi būti lygus nuliui. Atsispindėjusios bangos fazė skiriasi dydžiu π. Ji sklinda „per“ krintančią bangą (prisiminkite, kaip raibuliai pereina vienas per kitą tvenkinio paviršiuje). Ten, kur dvi bangos persikloja, spyruoklės nuokrypis atitinka dviejų bangų sumą. Po kurio laiko matome, kad atsispindėjusioji banga pasirodo visa ir nusklinda spyruokle atgal (žr. 6.28c) pav.).

Bangos dažnis, greitis ir bangos ilgis po atspindžio išlieka nepakitę. Jei tolimajame gale energija neprarandama, tai atsispindėjusios bangos amplitudė lygi krintančios bangos amplitudei. Mūsų aptartas ir 6.28a) bei 6.28b) paveiksluose pavaizduotas fazių skirtumas π ir nulemia stovinčiosios bangos susidarymą.

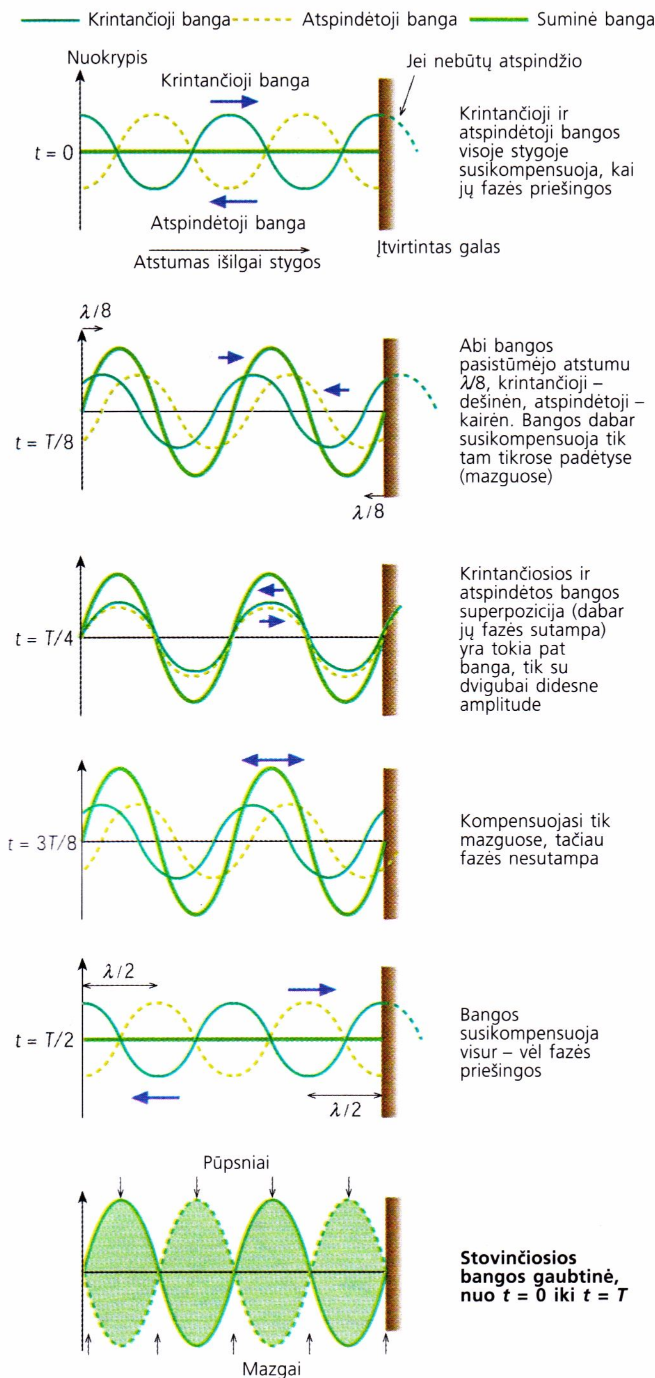
Kai bangos sklinda viena per kitą, nuokrypis bet kuriame taške yra lygus kiekvienos iš priešingomis kryptimis sklindančių bangų nuokrypių sumai. 6.29a) pav. parodytos dviejų priešingo-



6.28 pav. **Krintanti ir atsispindėjusioji bangos ilgoje plieninėje spyruoklėje**



6.29 pav. a) **Dviejų priešingomis kryptimis sklindančių bangų santykinės padėtys.** b) **Dviejų bangų, pavaizduotų** a) **dalyje, suminis nuokrypis**



6.30 pav. **Stovinčiosios bangos susidarymas vykstant krintančiosios ir atsispindėjusios bangų superpozicijai**

mis kryptimis sklindančių bangų santykinės padėtys. Pabandykite patys įsivaizduoti, kokį suminį vaizdą jūs matysite. Atsakymą rasite 6.29b) pav.

Stovinčiosios bangos stygoje

Panagrinėkime bėgančiąją skersinę bangą stygoje, kurios ilgis yra tiksliai lygus sveikajam bangos ilgių skaičiui.

Nelengva numatyti, kas vyksta bet kuriuo metu, todėl pasirinkime keletą ypatingų laiko momentų. Pradėkime nuo $t = 0$, kai *pirmyn* sklindančios bangos nuokrypis yra maksimalus abiejuose, artimajame ir tolimajame galuose, nors, žinoma, šį nuokrypį pakeis atspindėtoji banga. 6.30 pav. pavaizduotos krintanti ir atspindėtoji banga bei jų atstojamoji laiko momentu $t = 0$ ir vėlesniais laiko momentais pirmo pusperiodžio metu. Panašiai galėtume atvaizduoti bangas ir antrojo pusperiodžio metu – taip būtų baigtas vaizduoti visas procesas. Visų galimų padėčių gaubtinė parodyta paskutiniame grafike.

Stygoje sukeltų stovinčiųjų bangų dažnis

Kadangi stygos galuose visada yra mazgai, tai, kaip matėme, stygos ilgyje turi tilpti sveikasis pusbangių skaičius n. Ilgis stygoje

$$n\frac{\lambda}{2} = l$$

arba

$$\lambda = \frac{2l}{n}$$

Galima įrodyti, kad, jei T yra tamprumo jėga stygoje, o μ – jos ilgio vieneto masė, tai ta styga sklindančios bangos greitis

$$c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

(Šios formulės išvedimo šioje knygoje nepateiksime.)

Jau žinome, kad $c = f\lambda$, kur f – svyravimų dažnis. Todėl:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{n}{2l}c = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

■ Žr. 7 klausimą.

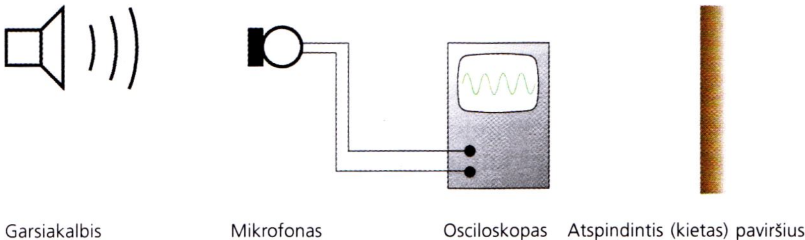
?

K Įrodykite, kad $\sqrt{\frac{T}{\mu}}$ dimensija yra tokia pat kaip ir c.

Stovinčiųjų bangų sužadinimas naudojant garso bangas ir mikrobangas

Garso bangos yra išilginės bangos ore (arba kitoje terpėje) ir panašios į išilgines bangas ilgoje plieninėje spyruoklėje. Jas sudaro oro sutankėjimai ir praretėjimai. Siunčiant garso bangas iš garsiakalbio ir joms atsispindint nuo *kieto* paviršiaus, ore susidaro stovinčioji banga. Susidaro sritys, kuriose oro molekulės smarkiai juda pirmyn ir atgal (pūpsniai) ir sritys, kur oras iš viso nejuda (mazgai). Tarp garsiakalbio ir atspindinčio paviršiaus stumdant mikrofoną (6.31 pav.), nuokrypio kitimą galima stebėti osciloskope.

Vietoj garsiakalbio galime naudoti mikrobangų siųstuvą. Šiuo atveju vietoj mikrofono ir osciloskopo reikėtų naudoti trumpųjų bangų imtuvą ir ampermetrą. Metalo plokštelė veikia kaip reflektorius. Eksperimentas panašus, tačiau pačių bangų prigimtis yra visiškai skirtinga. Mikrobangos yra elektromagnetinės, su jomis susidursite 16 skyriuje.

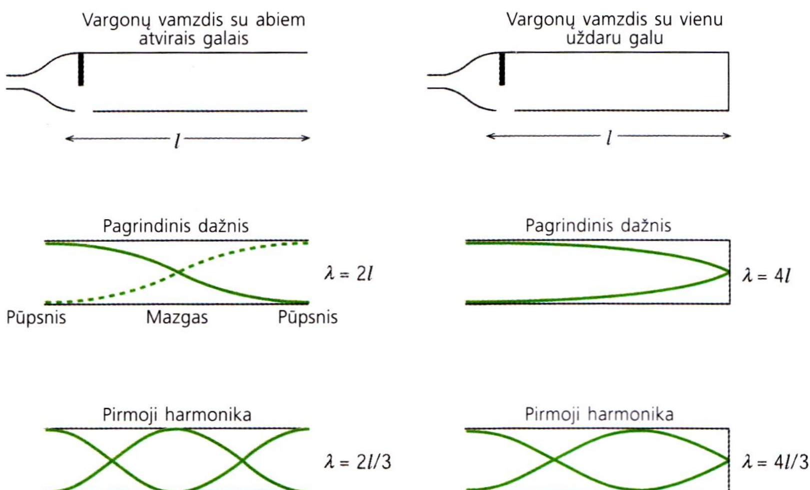


6.31 pav. **Stovinčiųjų bangų demonstravimas panaudojant garso bangas**

Stovinčiosios bangos vargonų vamzdyje

Tai – garso bangos, taigi jos išilginės. Jos susidaro dėl oro sutankėjimo ir praretėjimo vamzdyje. Mazgai ir pūpsniai atsiranda taip pat kaip ir virpančioje stygoje. Tačiau yra ir skirtumų. Kad stygoje susidarytų stovinčioji banga, abu jos galai standžiai įtvirtinami. Svyravimai vargonų vamzdyje gali būti sužadinti ir esant atviriems abiem jos galams, ir kai vienas galas uždaras, o kitas – atviras. Tada uždarajame gale turi būti mazgas, o atvirajame gale – pūpsnis (oras čia laisvai svyruoja pirmyn ir atgal). Šios dvi situacijos pavaizduotos 6.32 pav.

■ Žr. 9 ir 10 klausimus.



6.32 pav. **Stovinčiosios bangos svyravimų modos vargonų vamzdyje**

?

L a) Vargonų vamzdis atviras abiejuose galuose. Apskaičiuokite, koks turi būti jo ilgis, kad žemiausias svyravimų dažnis būtų 512 Hz.

b) Kokio ilgio turėtų būti vamzdis, jei vienas jo galas būtų uždaras?

Sutarkime, kad garso greitis ore yra 330 $m \cdot s^{-1}$.

Mušimai

Tarkime, suderinome dvi gitaros stygas, kad jos vibruotų artimu, bet nevisiškai tuo pačiu dažniu. Jei jas užgausime vienu metu, tai atrodys, kad jų sukelto garso intensyvumas periodiškai stiprėja ir silpnėja. Šis stiprėjimas ir silpnėjimas vyksta tam tikru dažniu, vadinamu **mušimų dažniu.** Šis reiškinys vyksta dėl to, kad abiejų stygų sukeltos garso bangos interferuoja, ir mūsų ausys girdi suminio intensyvumo pokyčius. Maksimalų intensyvumą girdime, kai bangos sumuojasi (interferuoja **konstruktyviai**), o intensyvumas minimalus, kai bangos susikompensuoja (interferuoja **destruktyviai**).

Kas atsitinka susidedant dviems atskiroms bangoms, galime matyti 6.33a) pav. Atstojamoji, gauta taikant **superpozicijos principą,** parodyta 6.33b) pav.

Norint išsiaiškinti mušimų periodą ir dažnį, reikia žinoti, kiek svyravimų įvyks tarp gretimų mušimo maksimumų. Apskaičiuosime kiekvienai stygai.

Trukmė tarp gretimų mušimų maksimumų yra T, o pirmoji styga suderinta dažniui f_1. Per laiką T pirmoji styga atliks f_1T svyravimus. Atitinkamai antroji styga, virpanti dažniu f_2, atliks f_2T svyravimą. Per periodą, kai mušimai pereina nuo vieno maksimumo prie gretimo, vienoje stygoje įvykusių svyravimų skaičius turi būti vienetu didesnis nei kitoje. Maksimume bangos pradeda svyruoti viena faze, palaipsniui jų fazės išsiskiria ir vėl suartėja, kai vienoje stygoje įvyksta tiksliai vienu svyravimu daugiau.

Taigi:

$$f_2T - f_1T = 1$$

Iš čia

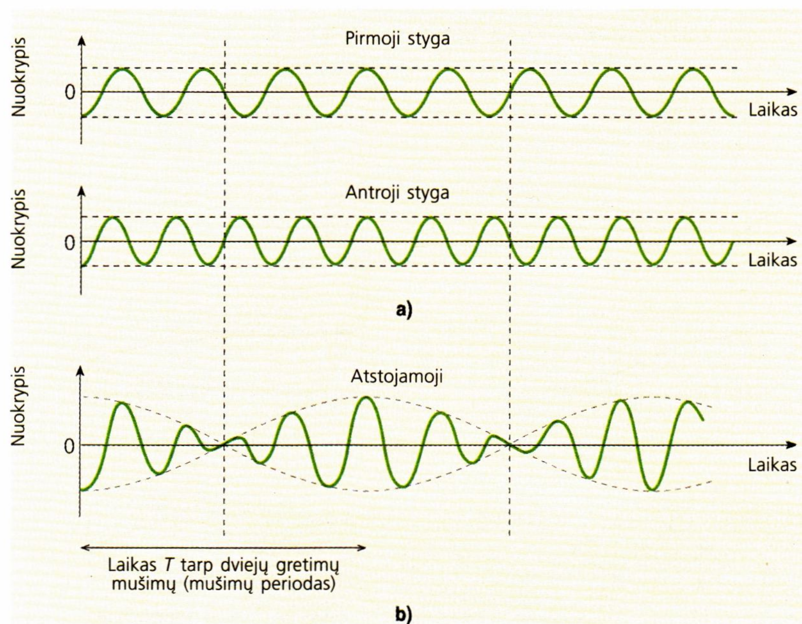
$$T(f_2 - f_1) = 1$$

$$T = \frac{1}{f_2 - f_1}$$

Taip pat galime užrašyti mušimų dažnį f_B:

$$f_B = \frac{1}{T}$$

M Tarp kamertono, virpančio 256 Hz dažniu, ir gitaros stygos susidaro 2,5 Hz dažnio mušimai. Raskite du galimus gitaros stygos svyravimų dažnius. Pasiūlykite, kaip eksperimentiškai nustatyti, kuri vertė yra teisinga.



6.33 pav. **Mušimų sužadinimas. Įsitikinkite, kad per mušimų periodą antrojoje stygoje įvyksta vienu svyravimu daugiau nei pirmojoje**

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių jūs turėtumėte žinoti jame pateiktas sąvokas ir mokėti naudotis nurodytomis lygtimis.

- Suvokti bangos amplitudės A, periodo T ir dažnio f prasmę bei žinoti jų sąryšį $T = 1/f = 2\pi/\omega$.
- Suvokti bangos greičio v ir bangos ilgio λ prasmę bei žinoti jų sąryšį $v = f\lambda$.
- Mechaninėms bangoms sklisti reikalinga terpė. Bangos gali būti išilginės ir skersinės.
- Matematinės švytuoklės periodas $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, o ant spyruoklės pakabinto svarmens svyravimo periodas $T = 2\pi\sqrt{m/k}$.
- Paprastojo harmoninio svyravimo pagreitis yra tiesiog proporcingas nuokrypiui nuo tam tikro taško ir nukreiptas link to taško $a = -\omega^2 x$.
- Harmoningai svyruojančio m masės kūno greitis $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$.
- Įsigilinkite į šiuos terminus: osciliatorius, nuokrypis, mazgas, pūpsnis, harmonika, obertonas, fazių skirtumas, slopinimas.
- Paprastojo harmoninio svyravimo metu energija pereina iš kinetinės į potencinę ir atgal.
- Supraskite skirtumą tarp stacionariųjų (stovinčiųjų) ir sklindančiųjų (bėgančiųjų) bangų.
- Bėgančiąją bangą galime aprašyti išraiška $y(x, t) = A \sin(\omega t + \phi)$, kur ϕ yra fazinis kampas.
- Gali vykti energijos perdavimas tarp svyravimus sukeliančios sistemos ir virpančios sistemos. Rezonansas įvyksta, kai jų dažniai sutampa.
- Dviejų bangų su artimais dažniais f_1 ir f_2 ($f_2 > f_1$) superpozicija sukelia mušimus, kurių dažnis lygus $f_2 - f_1$.

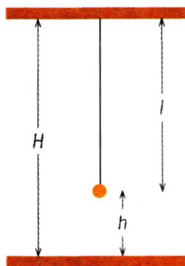
KLAUSIMAI

1 Apibrėžkite harmoninį judėjimą. Paaiškinkite, kaip galima sukonstruoti laikrodį naudojantis sistema, atliekančia paprastuosius harmoninius svyravimus. Pateikite tokios svyruojančios sistemos pavyzdį.

Svarmuo svyruoja pakabintas ant spyruoklės. Apibūdinkite energijos pokyčius, vykstančius, kai svarmuo pereina iš žemiausios padėties pro vidurinę iki aukščiausio taško.

2 6.K2 pav. parodyta l ilgio matematinė švytuoklė. Ji pakabinta ant aukštyje H virš grindų esančios pakabos, o jos pasvaras yra aukštyje h virš grindų. Pradėkite nuo $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ ir įrodykite, kad

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}H - \frac{4\pi^2}{g}h$$



6.K2 pav.

Koks dydis čia pažymėtas T?
Tarkime, kad jūs eksperimentiškai nustatėte seką T ir atitinkamų H verčių. Nubraižykite grafiką, iš kurio galėtumėte nustatyti g ir H.
Trumpai paaiškinkite, kaip grafike rasite g ir H vertes.

3 Ant spyruoklės pakabinto svarmens svyravimų periodas priklauso nuo jo masės, tuo tarpu švytuoklės pasvaro masė neturi įtakos jos svyravimų periodui. Kodėl taip yra? (Panagrinėkite potencinės ir kinetinės energijos virsmus abiem atvejais.)

4 Spyruoklė, kurios jėgos konstanta yra $k = 6\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$, vertikaliai kabo po virpančia pakaba. Prie spyruoklės apatinės dalies pritvirtinamas 0,15 kg masės svarmuo. Pakabos svyravimų dažnis tolygiai kinta nuo 0,1 Hz iki 10 Hz. Aprašykite, kaip vyksta svarmens judėjimas ir nubraižykite svarmens svyravimų amplitudės kitimo kintant dažniui grafiką.

5 Atomas molekulėje harmoniškai juda $8{,}0 \times 10^{-11}$ m amplitude ir $4{,}0 \times 10^{-13}$ s periodu. Raskite maksimalų jo greitį ir pagreitį.

6 Spiralinė spyruoklė, kurios jėgos konstanta $12\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$, pakabinta vertikaliai; po ja pakabinta 20 g masės svarstyklių lėkštelė ir ant jos padėtas 100 g kūnas. Apskaičiuokite, kokia maksimalia amplitude gali svyruoti ši sistema, jei 100 g masės kūnas visą laiką yra lėkštelėje, kai sistema išvedama iš pusiausvyros. Aiškiai suformuluokite savo argumentus. Lėkštelė prie spyruoklės pritvirtinta nejudamai. Kaip manote, kuriame judėjimo etape dings kontaktas? Atsakymą pagrįskite.

7 Šis klausimas apie stovinčiąsias bangas įtemptoje stygoje. Styga įtvirtinta viename gale. Ant per skriemulį permesto antrojo galo pakabintas svarmuo įtempia stygą. Stovinčiąsias bangas stygoje (jos ilgis 0,75 m) žadina virpesių generatorius. Trys žemiausieji dažniai, kuriems esant susidaro stovinčiosios bangos, lygūs 20 Hz, 40 Hz ir 60 Hz.

a) Nupieškite 60 Hz dažnio stovinčiąją bangą.

b) Kokio bangos ilgio stovinčioji banga susidaro esant 60 Hz dažniui?

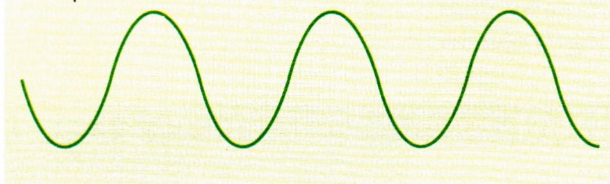
c) Stovinčioji banga susidaro iš dviejų priešingomis kryptimis sklindančių bėgančiųjų bangų.

(i) Apskaičiuokite styga sklindančios bėgančiosios bangos greitį.

(ii) Ar šis greitis pasikeistų padvigubinus virpesių generatoriaus dažnį? Pateikite savo samprotavimus.

d) 60 Hz yra girdimumo ruože, tačiau šis įtaisas nesukels stipraus garso. Paaiškinkite, kodėl tuo pačiu dažniu grojantis styginis instrumentas, pavyzdžiui, kontrabosas, skambės žymiai garsiau.

8 Bėgančioji banga sklinda ištempta styga. 6.K8 pav. pavaizduota, kaip tam tikru laiko momentu kinta nuokrypis išilgai stygos.


6.K8 pav.

a) Nusikopijuokite 6.K8 pav. ir savo brėžinyje pažymėkite: **i)** bangos amplitudę; **ii)** bangos ilgį.

b) **(i)** Kodėl užgavus įtemptą stygą, kurios abu galai įtvirtinti, joje susidaro stovinčioji banga?

(ii) Nubraižykite grafiką, atspindintį trečiosios harmonikos svyravimus tam tikro ilgio įtemptoje stygoje.

(iii) Nurodykite ir paaiškinkite pirmosios ir antrosios harmonikų dažnių santykį.

9

a) 0,280 m ilgio vargonų vamzdis su uždaru galu yra skirtas išgauti garsą, atitinkantį pagrindinį dažnį. Apskaičiuokite išgaunamo garso dažnį, jei garso greitis ore lygus 340 m · s^{-1}, o galinė korekcija yra 0,015 m.
(Galinė korekcija yra efektyvusis papildomas ilgis atvirame gale, kurį reikia pridėti prie fizinio vamzdžio ilgio.)

b) Plieninėje pianino stygos vieloje, kurios ilgis 0,400 m, o skersmuo 30 mm, vyksta skersiniai svyravimai pagrindinėje modoje. Apskaičiuokite įtempimo jėgą vieloje, jei ji skamba tuo pačiu dažniu, kaip vamzdis dalyje **a).**
(Plieno tankis = 8,00 × 10^3 kg · m^{-3}.)

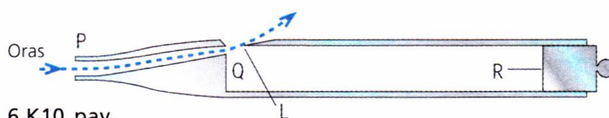
c) Nukritus temperatūrai, garso greitis ore sumažėjo iki 334 m · s^{-1}. Kai vamzdis ir viela kartu skamba savo pagrindiniais dažniais, girdimi mušimai, nes vamzdžio dažnis sumažėjo, o vielos dažnis išliko nepakitęs.

(i) Apskaičiuokite mušimų dažnį.

(ii) Pasakykite, kokia garso charakteristika kinta šiuo mušimų dažniu.

10 Vargonai turi daug skirtingu būdu padarytų vamzdžių.

a) Vienos rūšies vargonų vamzdžio konstrukcijos schema parodyta 6.K10 pav.



6.K10 pav.

Oras pučiamas pro galą P ir apteka smailą liežuvėlį L. Tai vamzdyje esančio oro stulpo gale Q sukelia trikdį. Kitas vamzdžio galas užkimštas slankiojamu kamščiu R.

(i) Paaiškinkite, kodėl vamzdyje susidaro stovinčioji banga. Įsivaizduokite, kad vamzdyje vyksta tokie procesai, kokie vyksta esant jos galui Q atviram.

(ii) Nubraižykite du grafikus, apibūdinančius stovinčiąją bangą vamzdyje, kai svyravimai vyksta pagrindiniu dažniu. Viename grafike atidėkite oro dalelių judėjimo amplitudės pasiskirstymą vamzdyje nuo Q iki R, kitame – oro slėgio pasiskirstymą.

b) Kitos rūšies vargoniniuose vamzdžiuose oras patenka panašiu būdu, tačiau juose nėra kamščio, uždarančio vamzdžio galą R.

(i) Apibūdinkite ir paaiškinkite, kaip skirsis pagrindiniai tonai, išgaunami dviem vienodo ilgio vamzdžiais: **a)** dalyje aprašytu uždaru vamzdžiu ir **b)** dalyje aprašytu atviru vamzdžiu.

(ii) Pučiant į vamzdį galima išgauti ne tik pagrindinio dažnio garsą. Nurodykite, kokios dažnių sekos yra galimos naudojant uždarus ir atvirus vamzdžius, ir trumpai paaiškinkite, kaip jos atsiranda abiem atvejais.

c) Dėl vietos stokos įrengiant vargonus jų vamzdžių efektyvusis ilgis turi būti ne didesnis kaip 3,0 m. Apskaičiuokite, kokio žemiausio dažnio natą galima sugroti šiais vargonais.
(Garso greitis ore = 330 m · s^{-1}.)

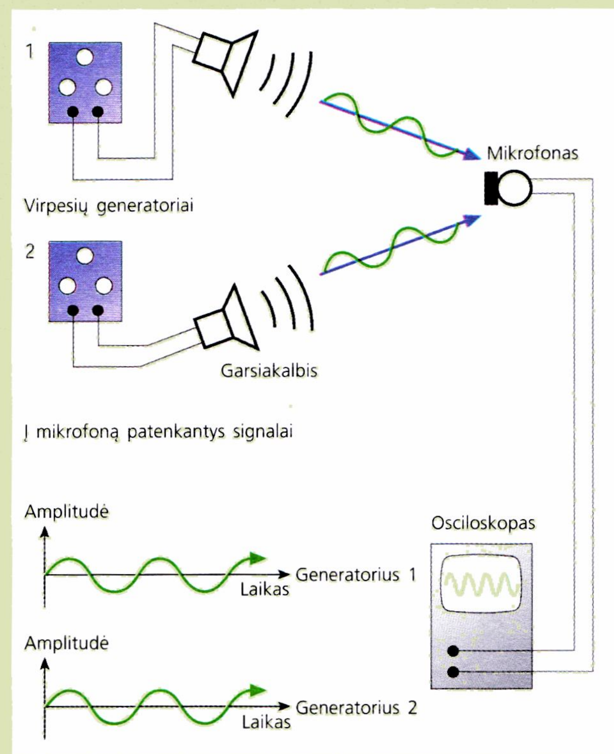
Užduotis

BANGŲ SUDĖTIS: SUPERPOZICIJOS PRINCIPAS

Pagal superpozicijos principą dvi bangos gali sklisti viena per kitą, ir abi šios bangos, krintančioji ir atsispindėjusioji, susideda. Taip susidedant kiek skirtingo dažnio dviems bangoms susidaro mušimai. Šioje užduotyje pamatysime, kaip susidedant dviem sinusinėms bangoms susidaro kitokios formos banga.

Laboratorijoje

Galime atlikti tokį eksperimentą, kurio metu sudėtume bangas, sklindančias iš dviejų ar daugiau garsiakalbių, ir naudodamiesi mikrofonu stebėtume jų atstojamąją osciloskopo ekrane (6.A1 pav.). Tačiau mes nesumuosime garsinio signalo mikrofonu, o naudosimės dinamine duomenų lentele ir skaitmeniškai sumuosime mūsų bangų amplitudes. Vietoj osciloskopo ekrano naudosimės programiškai piešiamais grafikais.



6.A1 pav. **Bangų superpozicijos demonstravimas osciloskopo ekrane naudojant mikrofoną**

1 Tarkime, abu virpesių generatoriai žadina 250 Hz bangas, o osciloskopas sukalibruotas taip, kad 1 cm *x* ašyje atitinka 1 ms.

a) Koks garso bangų periodas (sekundėmis)?

b) Koks bangų periodas ekrane (centimetrais)?

Naudojant dinaminę duomenų lentelę

Atverkite naują dinaminę duomenų lentelę ir užpildykite langelius:

A1: Laikas(s) B1: Atstojamoji(cm) C1: Y1(cm)

D1: Laikas stulpeliui Y2(s) E1: Y2(cm)

Nuo A2 iki A18: Įveskite laiko vertes 0,25 žingsniu nuo 0 iki 4.

Nuo D2 iki D18: Nukopijuokite tas pačias vertes kaip langeliuose nuo A2 iki A18.

C2 ir E2: =sin(PI()*A2/2) arba įveskite 3,142 vietoj PI().

Pasitikrinkite, ar C2 ir E2 verčių kitimas atitinka periodą, apskaičiuotą 1-ame klausime.

Grįžkite į B2 ir įrašykite: = C2 + E2.

Pasižymėkite langelius nuo C2 iki C18 ir pasinaudoję komanda **Užpildyti žemyn** užpildykite jas. Tą patį atlikite su langeliais nuo E2 iki E18 ir nuo B2 iki B18.

Grafiko braižymas

Pasižymėkite langelius nuo A1 iki B18 (t. y. pasižymėkite du stulpelius po 18 ląstelių)

Iš meniu **Failai** pasirinkite **Naujas**, po to **Grafikas** ir **X vertės X–Y grafikui.**

(Skirtingose dinaminėse lentelėse komandos gali šiek tiek skirtis, bet jums reikia pasinaudoti *x–y* grafikų piešimo galimybėmis.)

Dabar pamatysite grafike atidėtą suminės bangos amplitudės priklausomybę nuo laiko, kuri bus lygiai tokia kaip osciloskopo ekrane. Tai dviejų bangų, kurių amplitudės ir fazės vienodos, atstojamoji.

Kai fazės ir amplitudės yra skirtingos

Stulpelyje D galima įvesti kitas laiko vertes ir tuo būdu pakeisti Y2 fazę Y1 atžvilgiu. Pavyzdžiui, langeliuose nuo D2 iki D18 įrašykite vertes 0,25 žingsniu pirmiausia nuo 2 iki 4, o po to nuo 0,25 iki 2. Dabar Y2 fazė nesutaps su Y1 faze dydžiu π. Jei norite pakeisti amplitudes, pavyzdžiui, amplitudžių santykį padaryti 3:1, užpildykite langelius įrašydami sin(PI()*A2/2)/3.

Meandro formos ir pjūklinės bangos

Atidarykite naują dinaminę duomenų lentelę ir užpildykite langelius:

A1: Laikas(s) B1: Atstojamoji(cm) C1: A1(cm)

D1: A2(cm) E1: A3(cm) F1: A4(cm)

Nuo A2 iki A18: Kaip ir anksčiau, įrašykite laiko vertes (nukopijuokite iš pirmosios lentelės).

C2: = sin(PI()*A2/2) D2: = (sin(PI()*3*A2/2))/3

E2: = (sin(PI()*5*A2/2))/5 F2: = (sin(PI()*7*A2/2))/7

Apibūdinkite, kuo skiriasi skirtinguose stulpeliuose įvestos sinusinių bangų vertės C2, D2, E2 ir F2.

Apibrėžkite langelį B2: = C2+D2+E2+F2.

Užpildykite langelius nuo B1 iki F18.

Pasižymėkite langelius nuo A1 iki B18 ir, kaip ir anksčiau, nubraižykite *x–y* grafiką.

2 Jūs turėjote gauti grafiką, kurio forma primena meandrą.

a) Pasiūlykite, kaip pagerinti brėžinį, kad būtų artimesnis meandrui.

b) Kokį meandrinės bangos ypatumą yra itin sunku tiksliai atkurti?

Pjūklinei bangai gauti reikia užpildyti:

C2: = sin(PI()*A2/2) D2: = –(sin(PI()*2*A2/2))/2

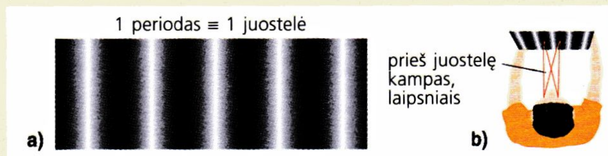
E2: = (sin(PI()*3*A2/2))/3 F2: = (sin(PI()*4*A2/2))/4

(Kaip matote, pjūklo dantis prasideda ne koordinačių pradžioje.)

Pagalvokite, kaip būtų galima gauti kitokias bangos formas. Panaudojus pakankamai daug sinusinių dedamųjų galima gauti bet kokį signalą.

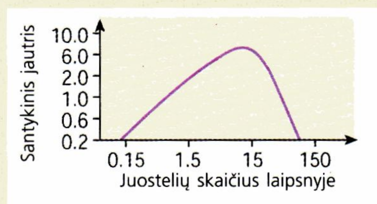
Sinusiniai pokyčiai ir žmogaus akies atsakas

Bangų skaidymas sinusinėmis dedamosiomis yra labai svarbus šiuolaikinėje fizikoje. Ši metodika yra vadinama **Furjė (*Forier*) analize.** Ji naudojama ir optikoje, ir elektronikoje. Jutikliai, taip pat ir žmogaus akis, reaguoja į signalo dedamąsias, kurios nulemia jo formą. Daugelis jutiklių silpnai reaguoja į aukšto dažnio signalus, t. y. beveik nefiksuoja papildomų narių, reikalingų norint tiksliai atkurti bangos formą (jūs neįtraukėte jų į savo duomenų lentelę). Dabar panagrinėkime eksperimentą, kuriam naudojami paveikslėliai, parodyti 6.A2a) pav., – juostos, susidarančios lape, kai atspindėtos šviesos intensyvumas kinta sinuso dėsniu. Kiekvienas paveikslas turi skirtingo pločio juostas.



6.A2 pav. a) **Sinuso dėsniu kintančio šviesos intensyvumo vaizdas.** b) **Vaizdas į stebėtoją iš viršaus**

Stebėtojas vieną po kito peržiūri paveikslus iš geriausio matomumo atstumo, o eksperimentatorius užrašo, kiek pastangų prireikia stebėtojui, kad atskirtų juosteles. (Mums nebūtina gilintis į šios procedūros detales.) Taip galima įvertinti akies jautrumą, kurį atitinka grafikas 6.A3 pav. Atkreipkite dėmesį, kad ir *x*, ir *y* skalės yra logaritminės.



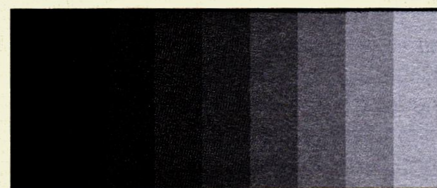
6.A3 pav. **Grafikas, atspindintis, kaip akis reaguoja į skirtingu dažniu pasikartojančias sinusines juosteles**

Grafiko kairėje, kai juostelės plotį atitinka maždaug 7° kampas, akis neįstengia išskirti intensyvumo skirtumų. Taip pat ji nefiksuoja intensyvumo pokyčių, kai vienam laipsniui tenka daugiau nei 100 juostelių. Taigi akis silpnai reaguoja į intensyvumo kitimą didelių kampų ruože, ir taip pat silpnai junta labai spartų jo kitimą, kai juostelės yra labai arti viena kitos.

3 Įvertinkite, kiek kartų akies jautrumas yra didesnis, kai linijos pasikartoja 15 kartų viename laipsnyje, negu tada, kai juostos pasikartoja kas 6,5 laipsnio (maždaug 0,15 kartų viename laipsnyje).

Laiptiškas intensyvumo kitimas

Naudodamiesi 6.A3 pav. parodytu vaizdu galime išsiaiškinti, kaip akis reaguoja į tam tikrus intensyvumo pokyčius, ir kaip akį galima apgauti; taip ir būna vadinamuose **optinės iliuzijos** piešiniuose. Paveiksle 6.A4 pavaizduotas tokios iliuzijos pavyzdys – intensyvumo laipteliai.



6.A4 pav. **Intensyvumo laipteliai; optinės iliuzijos pavyzdys**

4 Apibūdinkite, ką iš tiesų matote.

Laipteliai turi „žingsnio plotį", kurį, savo ruožtu, galime išmatuoti kampu, kuriuo jį mato akis, esanti geriausio matymo nuotolyje (laikoma, kad tai 0,3 m) nuo lapo su piešiniu.

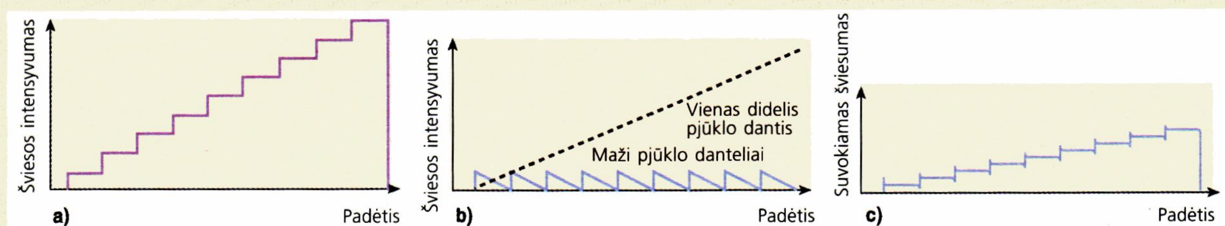
5 Įvertinkite šį kampą, taip pat ir žingsnių skaičių, tenkantį 1 laipsniui, naudodamiesi 6.A4 pav.

6.A5a) pav. atvaizduotą kreivę galime išskaidyti į vieną didelį pjūklo dantį ir seką mažesnių dantukų, kaip pavaizduota b). Įsitikinkite, kad sudėjus šias dvi kreives taip ir bus. Atskirą pjūklo dantį ir dantukus iš b) išskaidžius į sinusines bangas, kaip aprašyta skyrelyje **Meandro formos ir pjūklinės bangos,** jų suma, pavaizduota c), nusako šviesumo kitimą, kurį suvokia stebėtojas.

6 Ar šviesumo pasiskirstymas atitinka jūsų aprašymą, kurį pateikėte kaip atsakymą į 4 klausimą?

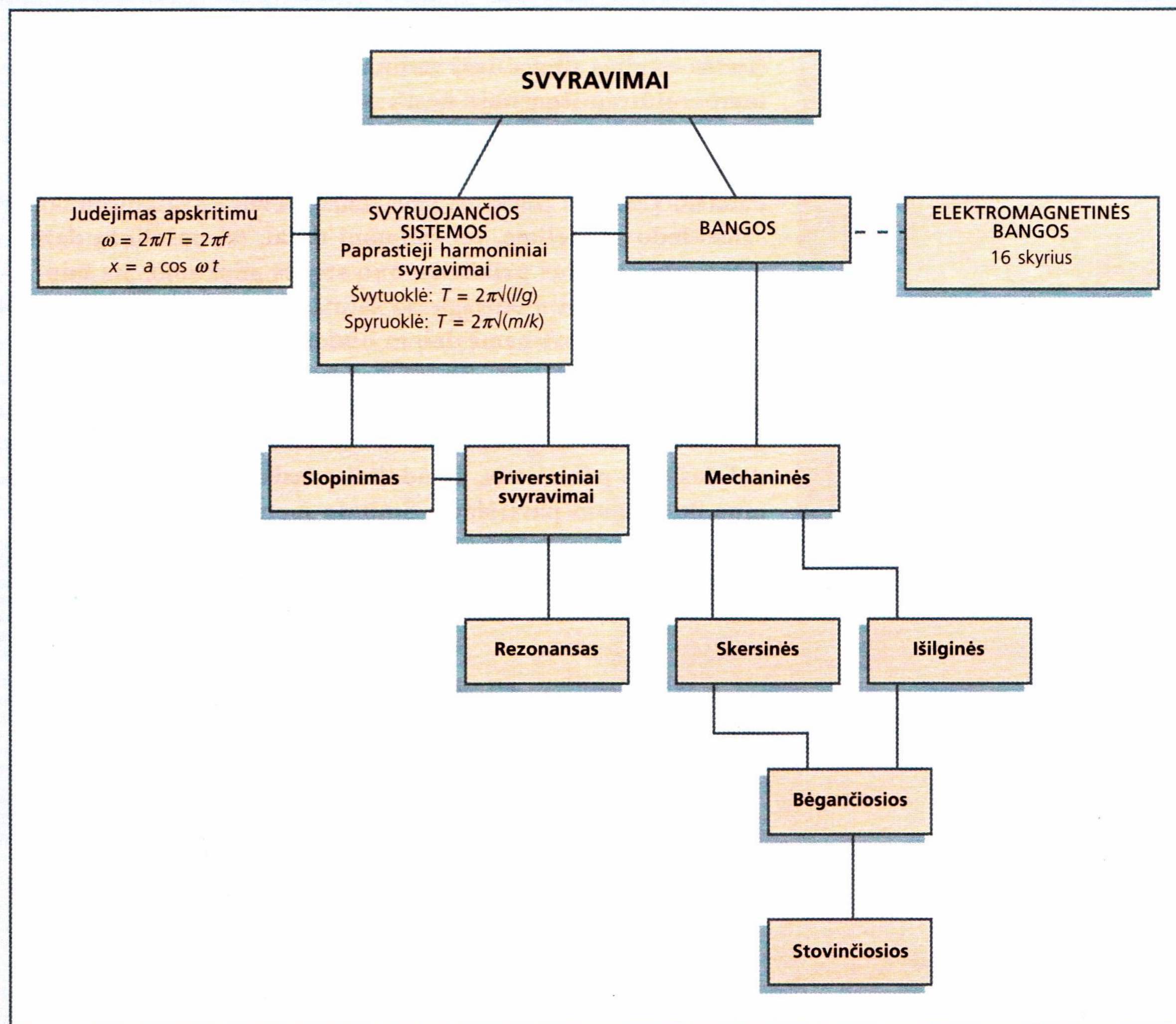
Svarbu suvokti, kad akis yra itin geras matavimo prietaisas, bet ji gali ir iškreipti gaunamą įėjimo signalą, lygiai taip pat, kaip dirbtiniai elektroniniai ar optiniai jutikliai gali iškreipti į juos patenkantį signalą.

6.A5 pav. **Intensyvumo laipteliai a) gali būti išskaidyti į pjūklines dedamąsias b) ir akiai atrodo taip, kaip pavaizduota c).**

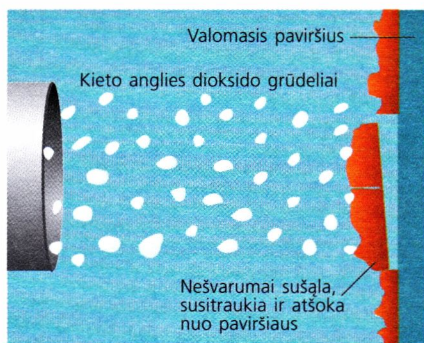


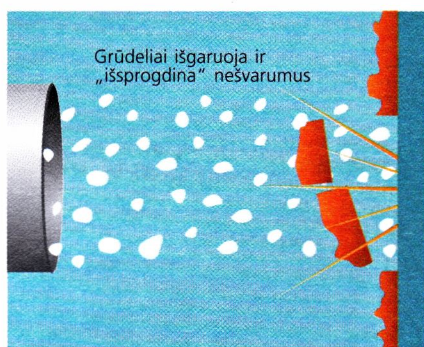
SVYRAVIMAI IR MECHANINĖS BANGOS

Skyriaus schemoje apibendrintos pagrindinės šio skyriaus sąvokos ir jų tarpusavio sąryšiai. Palyginkite schemą su savo mokymosi programa ir įsitikinkite, ar suprantate šias sąvokas ir įžvelgiate, kaip jos tarpusavyje susijusios.



7 Medžiagos





Paviršių valymas sausu ledu

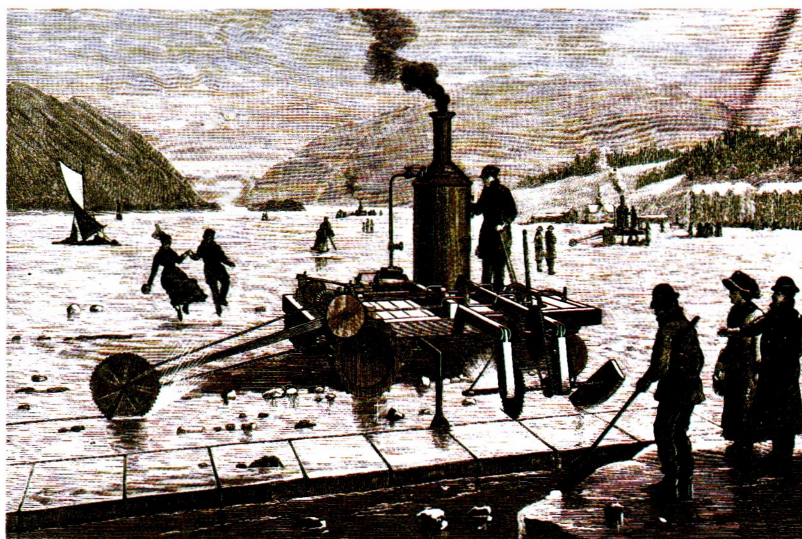
Kietas anglies dioksidas, vadinamas sausu ledu, nes –78 °C temperatūroje išgaruoja neskystėdamas, dabar naudojamas kaip valiklis dažų, alyvos ar tepalo dėmėms nuo mechanizmų detalių pašalinti.

Panašiu į smėlio purkštuvą prietaisu detalės yra apipurškiamos sauso ledo grūdeliais. Jei šalinami dažai, tai pašalintų dažų sluoksnių skaičius priklauso nuo srovės stiprumo. Jis taip parenkamas, kad medžiaga po šalinamu sluoksniu nenukentėtų. Nešvarumai pašalinami dviem būdais. Pirmiausia, kadangi ledo temperatūra yra –78 °C, nešvarumai staiga atšąla ir susitraukia. Taip suyra kontaktas su apačioje esančia medžiaga. Be to, kieti anglies dioksido grūdeliai atskelia nešvarumų daleles nuo paviršiaus. Grūdeliai prasiskverbia pro nešvarumus iki valomo paviršiaus. Smūgio metu grūdeliai sušyla ir staiga išgaruoja. Jų tūris padidėja 800 kartų. Dujos sukelia mažyčius sprogimus nešvarumų užnugaryje ir juos nuplėšia. Kol valoma, sausas ledas visiškai išgaruoja ir nepalieka jokių papildomų teršalų, tik pašalintus nešvarumus. Taigi nedaroma jokia žala aplinkai, kitaip nei labiau įprastais valymo būdais, naudojant tirpiklius.

1 SUPAŽINDINIMAS SU MEDŽIAGOS AGREGATINĖMIS BŪSENOMIS

Kasdien matome upėje ar iš čiaupo tekantį vandenį. Sakome, kad jis yra **skystas.** Nors tekėdamas upėje vanduo išlaiko savo tūrį, jo forma yra nepastovi.

Vandenį atšaldžius žemiau 0 °C jis praranda gebėjimą tekėti ir virsta ledu. Ledas išlaiko ne tik savo tūrį, bet ir formą. Prieš šaldytuvų erą ledo luitai buvo išpjaunami žiemos metu, laikomi specialiose ledainėse ir vasarą naudojami maisto produktams šaldyti.



7.1 pav. **Ledo luitų pjovimas Šv. Lauryno upėje devynioliktajame amžiuje**

Ledo savybės taip skiriasi nuo vandens savybių, kad sakome, jog vanduo virsdamas ledu perėjo į kitą „agregatinę būseną“ (arba „fazę“). Jis tapo **kietuoju kūnu.**

Pakaitinę vandenį katile iki 100 °C gauname dar vieną medžiagos būseną – jis tampa **dujomis.** Vanduo sudarytas iš molekulių, kurios nuolat juda. Kaitinant vandenį šios molekulės pradeda judėti taip greitai, kad palieka katilą ir kartu su oro molekulėmis pasklinda į aplinką. Sakome, kad vanduo **garuoja.** Tam tikru mastu garavimas vyksta net ir nekaitinant vandens – kaitinimas tik paspartina šį procesą.

Dujos neišlaiko pastovaus tūrio – jų molekulės pasklinda visame kambaryje.

Atkreipkite dėmesį, kad „garas“, kurį matote kylantį iš verdančio katilo, nėra dujos. Iš tiesų, šis „garas“ yra sudarytas iš mažyčių vandens lašelių, kurie atsiranda, kai patekę į šaltesnį orą vandens garai **kondensuojasi.** Šiuos lašelius neša paskui save dujų srautas.

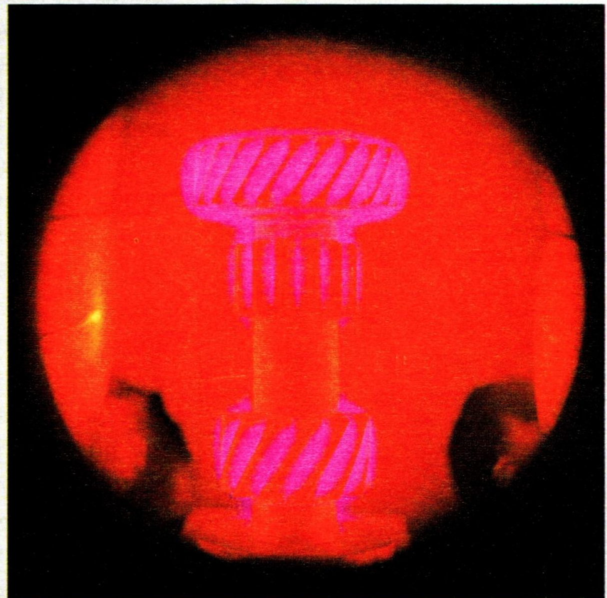
Galime įsitikinti, kad pagrindinis bruožas, kuriuo skiriasi skirtingos medžiagos būsenos, – tai atskirų atomų ar molekulių tarpusavio ryšys.

Plazma – ketvirtoji medžiagos būsena

Jei dujų molekules įkaitinsime iki labai aukštos temperatūros, gausime ketvirtąją medžiagos būseną – **plazmą.** Jau keletą pastarųjų šimtmečių buvo aišku, kad cheminių reakcijų nepakanka pagaminti tokiam energijos kiekiui, kurį spinduliuoja žvaigždės, tarp jų ir Saulė. Saulėje temperatūra tokia aukšta, kad išoriniai elektronai atomuose yra atsiskyrę nuo branduolius sudarančių protonų ir neutronų. Taip susidariusios teigiamai ir neigiamai įelektrintos dalelės juda atskirai ir labai greitai, sudarydamos plazmą.

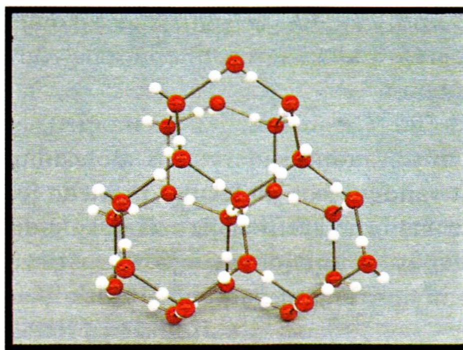
Taip susidaro plazma. Kadangi žvaigždėje yra didelis medžiagos kiekis, gravitacinės jėgos stengiasi suspausti daleles į mažesnį tūrį. Slėgis didėja, ir elektronai bei protonai juda vis greičiau ir greičiau. Temperatūra vis kyla, o energija išspinduliuojama elektromagnetinės spinduliuotės (fotonų) pavidalu. Energija gali būti nuolatos spinduliuojama tik tuomet, jei vyksta branduolinės reakcijos. Jungiantis periodinės elementų lentelės pradžioje esančių elementų atomams, nedidelė jų masės dalis virsta labai dideliu energijos kiekiu. Taip palaikoma aukšta temperatūra.

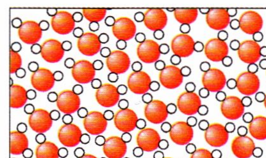
Plazma Žemėje paprastai nesusidaro – ji gaunama tik mokslinėse laboratorijose. Tačiau laboratorijose vykdoma daug tyrimų siekiant dvidešimt pirmajame šimtmetyje išmokti gaminti didžiulius energijos kiekius branduolinių reakcijų pagalba. Nelengva sukurti aukštą temperatūrą, kuri reikalinga didelės energijos plazmai palaikyti (nors plazma sukuriama ir argoninio lanko suvirinimo aparatuose). Siekiant sukurti reikiamas sąlygas branduolių jungimuisi, mažos vandenilio ar helio kapsulės bombarduojamos lazerio spinduliais iš įvairių pusių, kad susidarytų aukšta temperatūra, reikalinga atsirasti plazmai, o įelektrintos dalelės magnetiniais laukais spaudžiamos iki didelio tankio. Tačiau valdoma branduolinė reakcija dar nerealizuota.

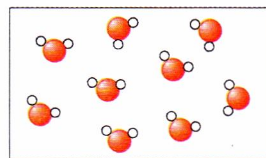


7.2 pav. Plazminė kamera, kurioje grūdinama automobilio sankabos detalė: plazmos jonai „ištirpsta“ plieno paviršiuje (kuriam suteikiamas neigiamas krūvis, kad juos pritrauktų), ir taip susidaro modifikuotas, kietesnis paviršius

Daugiau apie branduolių jungimąsi ir procesus žvaigždėse sužinosite 27 skyriuje (2-oje dalyje).


a) Ledas


b) Vanduo


c) Vandens garai

7.3 pav. **Atomų išsidėstymas lede, vandenyje ir vandens garuose (dujose)**

Kietuosiuose kūnuose branduoliai laikosi sukibę taip stipriai, kad galimas tik labai menkas judėjimas. Atomai ar molekulės gali tik virpėti – kuo aukštesnė temperatūra, tuo didesne amplitude jie virpa. Tačiau jiems yra labai sunku prasibrauti pro gretimus kaimynus. Jie išsidėstę tam tikra tvarka, kaip, tarkime, lede (7.3a) pav.).

Skysčiuose tarp atomų ar molekulių veikia traukos jėgos, tačiau jie gali, nors ir sunkiai, judėti vienas pro kitą. Vanduo susideda iš molekulių, kurias sudaro du vandenilio ir vienas deguonies atomas, nors labai maža šių molekulių dalis (1 iš 10^7) gali būti suskilusi į priešingai įelektrintas daleles, vadinamas **jonais.**

Kai vanduo virsta dujomis, dujų molekulės juda laisvai ir, kaip vėliau įsitikinsime, dideliais greičiais. Atstumai tarp molekulių yra dideli – dujų tankis yra beveik tūkstantį kartų mažesnis nei kietųjų kūnų.

Taigi skirtingos medžiagų būsenos pasižymi labai skirtingomis savybėmis. Viena iš svarbių savybių yra tankis, dažniausiai žymimas ρ (graikiška „ro“). Tankis lygus vienetinio tūrio masei. Taigi jei M – masė, o V – tūris, tai:

$$\textbf{Tankis} = \frac{\textbf{masė}}{\textbf{tūris}}$$

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Pagal įprastinių medžiagų tankį kambario temperatūroje galime nustatyti jų būseną. Keleto medžiagų duomenys pateikti 7.1 lentelėje. Lentelėje pastebėsite ir keletą netikėtumų.

7.1 lentelė. **Įprastinių medžiagų tankis kambario temperatūroje (20 °C)**

Medžiaga	Tankis (kg · m^{-3})
Kietieji kūnai	
Aliuminis	2700
Varis	8930
Auksas	19 300
Ledas (0 °C)	917
Plastikas (PVC)	1300
Platina	21
Uranas	1900
Skysčiai	
Glicerolis	1260
Gyvsidabris	13 500
Alyvuogių aliejus	9200
Vanduo	998
Dujos	
Oras	1,29
Anglies dioksidas	1,98
Helis	0,177
Vandenilis	0,0899
Deguonis	1,43

Dujų tankis labai skiriasi nuo skysčių ir kietųjų kūnų tankio. Riba tarp kietųjų kūnų ir skysčių tankio nėra tokia ryški, nors ir čia pasitaiko anomalijų (nukrypimų). Pavyzdžiui, gyvsidabrio tankis kambario temperatūroje yra didesnis nei vario, tačiau gyvsidabris yra skystis, nes gali tekėti, o varis – kietasis kūnas, nes jis kietas, ir jį galima pjauti. Kitas pavyzdys – glicerolis. Skysto pavidalo glicerolio tankis yra panašus į daugelio plastikų.

Daugumos cheminių junginių tankis yra didesnis, kai jie kietos būsenos, o skystos – mažesnis. Tačiau palyginkime vandenį ir ledą: 0 °C temperatūroje ledo tankis turi būti mažesnis nei vandens, nes ledas susidaro vandens telkinio paviršiuje (ledkalniai plauko jūros paviršiuje). Jei ledas nesilaikytų vandens paviršiuje, o skęstų į dugną, tai palaipsniui visas vandens telkinys virstų ledu. Mes labai stengiamės termiškai izoliuoti vandens vamzdynus artėjant žiemai, nes šaldamas vanduo plečiasi. Vandeniui virstant ledu jo tūris didėja, todėl jis suplėšo vamzdžius – ledas juk negali tekėti. Namų šeimininkai žino, kad būna problemų, kai vanduo neteka, arba kai ledas ištirpsta ir vėl virsta vandeniu!

?

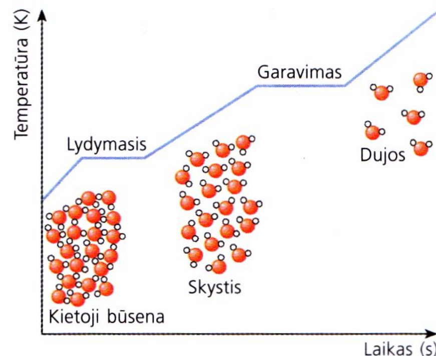
A Kas atsitiktų gyviems organizmams tvenkinyje, jei ledo tankis būtų didesnis už vandens?

2 MEDŽIAGOS BŪSENOS KITIMAS

Toliau nagrinėkime vandenį. Kad jis virstų ledu, turime sumažinti jo temperatūrą iki 0 °C (Celsijaus nulio) ir po to dar atimti iš jo šiluminę energiją, kai virtimo ledu procesas jau prasidėjęs. Įprastas būdas atimti šią energiją – atšaldyti aplinką žemiau 0 °C. Tada vanduo atiduoda savo energiją aplinkai.

Energija, kurią 0 °C temperatūroje esantis vanduo turi atiduoti, kad virstų 0 °C temperatūros ledu, vadinama **slaptąja kietėjimo (kristalizacijos) šiluma.** Tai energija, kurią reikia atimti iš molekulių, kad jos netektų galimybės judėti dideliais atstumais. Dėl šio sumažinimo temperatūra nesumažėja. Temperatūra, kurioje visa tai vyksta, vadinama **kietėjimo temperatūra.** Vandens kietėjimo temperatūra lygi 0 °C. Jei darome atvirkščiai, t. y. jei šildome ledą, kad jis virstų vandeniu, toji kritinė temperatūra vadinama **lydymosi temperatūra.** Kietėjimo ir lydymosi temperatūra paprastai vadinama lydymosi tašku.

Jei norime paversti vandenį dujomis, pirmiausia pakaitiname jį iki 100 °C, t. y. iki virimo temperatūros. Po to kaitiname toliau, kad suteiktume **slaptąją garavimo šilumą.** Tai energija, kurią turime suteikti vandens molekulėms, kad nutolintume jas vienas nuo kitų, ir molekulių kinetinė energija išaugtų tiek, kiek reikia dujinei būsenai pasiekti. Ši kinetinė energija yra didelė, ir slaptoji garavimo šiluma yra didesnė už slaptąją lydymosi šilumą.



7.4 pav. **Medžiagos temperatūros kitimas laike, kai ji kaitinama pastovia sparta ir pereina skirtingas fazes**

7.4 pav. atvaizduotas medžiagos temperatūros kitimas laike, kai ji kaitinama pastovia sparta ir praeina įvairias fazes. Tirpimo ir garavimo metu temperatūra nekinta. Tuo metu suteiktoji energija virsta slaptąja šiluma.

7.2 lentelėje pateiktos slaptosios šilumos, reikalingos pakeisti kai kurių medžiagų 1 kg būseną. Tai vadinama *savitąja* slaptąja šiluma. Kadangi slaptoji šiluma matuojama džauliais, savitoji slaptoji šiluma matuojama džauliais kilogramui ($J \cdot kg^{-1}$).

Kūnui, kurio bendroji masė lygi m, o savitoji slaptoji šiluma L, prireiks tokio energijos kiekio E:

Energija = masė × slaptoji šiluma 1 kilogramui

$$E = mL$$

B Raskite slaptosios lydymosi ir garavimo šilumų santykį vandeniui. Palyginkite jį su analogiškais santykiais kitoms medžiagoms. Pakomentuokite.

7.2 lentelė. **Kai kurių medžiagų slaptosios šilumos bei lydymosi ir virimo taškai**

Medžiaga	Lydymosi taškas (°C)	Slaptoji lydymosi šiluma ($MJ \cdot kg^{-1}$)	Virimo taškas (°C)	Slaptoji garavimo šiluma ($MJ \cdot kg^{-1}$)
Aliuminis	661	0,38	2520	10,8
Varis	1085	0,21	2590	4,7
Auksas	1065	0,07	2850	1,7
Gyvsidabris	–39	0,016	357	0,29
Deguonis (O_2)	–219	0,014	–183	0,22
Vanduo	0	0,333	100	2,257

Lydymosi ir virimo temperatūrų priklausomybė nuo slėgio

Iki šiol laikėme, kad vandens slėgis yra tam tikro didumo. Iš tiesų lydymosi ir virimo temperatūros kinta, jei pakinta aplinkos slėgis. Šį efektą pastebime tik tada, kai slėgio pokytis gana didelis, tačiau su tuo susiduriame dažnai.

Jei didiname slėgį, veikiantį ledo luitą, tai lydymosi temperatūra žemėja. Taip atsitinka čiuožiant pačiūžomis. Aštrios pačiūžų pavažos veikia ledą didele jėga į mažą plotą (7.5 pav.).

C Elektriniame virdulyje yra trys litrai (3×10^{-3} m^3) 100 °C temperatūros vandens.

a) Apskaičiuokite energijos kiekį, kurio reikia visam vandeniui iš virdulio išgarinti. Tarkime, kad visa energija sunaudojama garinimo procesui ir nėra jokių jos nuostolių į aplinką.

b) Elektros energijos kaina yra 7,5 penso už kilovatvalandę. Nustatykite, kiek kainuos viso vandens išgarinimas.

(Tegu vandens tankis lygus 10^3 $kg \cdot m^{-3}$.)



7.5 pav. **Dailusis čiuožimas. Veikiant slėgiui, ledas po pavaža tirpsta**

Po pavaža susidaro labai didelis slėgis ir tai sudaro sąlygas ledui tirpti. Vanduo gerai tepa čiuožimo paviršių.

Ledo temperatūra ir pavažų plotas turi būti kruopščiai suderinti. Jei pačiūžų pavažos per plačios, tai jos nesudarys pakankamo slėgio. Netgi pačiūžomis su siauromis pavažomis neįmanoma čiuožti ledu, kurio temperatūra yra per žema.

Vandens garavimo temperatūra žemėja *mažinant* slėgį, todėl kalno viršūnėje, kur atmosferos slėgis yra mažesnis, vanduo užverda žemesnėje temperatūroje nei jūros lygyje. Kalnai nėra geriausia vieta gerai arbatai paruošti: nors virimo temperatūra sumažėja nežymiai, to pakanka, kad iš arbatžolių ištraukoje kvapniųjų medžiagų kiekis pastebimai sumažėtų!

Sublimacija

Kai kurios medžiagos gali iš kietosios būsenos virsti tiesiai į dujinę. Šis procesas vadinamas **sublimacija.** Kad ji vyktų, gali tekti parinkti reikiamą temperatūrą ir slėgį. Pavyzdžiui, anglies dioksidas (sausas ledas) išlieka kietas iki –78 °C, po to virsta tiesiog dujomis. Sausas ledas mokslinėse laboratorijose naudojamas aparatūrai ir bandiniams atšaldyti. Jis taip pat naudojamas teatruose dirbtiniam rūkui daryti: garuojančios anglies dioksido molekulės atšaldo orą, ir ore esantis vanduo kondensuojasi į lašelius.

3 ATOMAI IR MOLEKULĖS

5-ame skyriuje sužinojome, kad kietieji kūnai mikrodalelių lygyje gali įgyti įvairias struktūras. Visais atvejais kietuosius kūnus sudaro arti vienas kito esantys atomai, nors šių atomų išsidėstymas gali žymiai skirtis. Čia panagrinėsime keletą šio išsidėstymo variantų, ypač tuos, kurie yra tvarkūs. Tam naudosimės labai paprastu modeliu, pagal kurį atomai laikomi vienodais standžiais rutuliukais. Atomai sudaro panašų į marmuro ar polistireno rutuliukų dėstinį.

Jei dėliosime marmuro ar polistireno rutuliukus, jie priešinsis tolesniam suspaudimui, kai jų paviršiai susilies. Kadangi marmuras kietesnis, iš jo pagaminti rutuliukai priešinsis stipriau, negu polistireniniai. Abiem atvejais atsiras jėga, besipriešinanti judėjimui.

Panašiai atsiranda stūmos jėga, kai suartinami du atomai. Ji atsiranda dėl išorinių elektronų, kurie vieni kitus stumia suartėjus atomams. Stūmos jėga, 7.6 pav. atvaizduota raudona kreive, mažėjant nuotoliui tarp atomų, didėja labai sparčiai.

Visiškai nesunku atskirti vieną nuo kito marmuro ar polistireno rutuliukus – tarp jų neveikia traukos jėgos, kurias reikėtų įveikti. Tačiau atomai priešinasi atskyrimui, nes tarp jų veikia traukos jėga. Jos ženklas yra neigiamas. Tačiau traukos jėga turi sparčiai mažėti didėjant atstumams tarp atomų. Mėlyna kreivė 7.6 pav. apytiksliai rodo, kaip kinta traukos jėga kintant atstumui. Kai atstumas didelis, ji lygi nuliui. Didėjant atstumui, panašiai mažėja ir stūmos jėga. Atkreipkite dėmesį, kad šis mažėjimas spartesnis nei traukos jėgos, todėl atomai vis dar traukia vienas kitą, kai stūmos jėga jau sumažėjusi iki nulio.

Norint rasti atstojamąją jėgą, reikia susumuoti traukos ir stūmos jėgas. Tai tolygu dviejų kreivių susumavimui. Atstojamoji jė-

gos priklausomybės nuo atstumo kreivė priklausys nuo stūmos ir traukos jėgų santykio. Atstojamosios jėgos priklausomybė nuo atstumo, 7.6 paveiksle pavaizduota violetine kreive, atspindi jėgą, veikiančią tarp dviejų gretimų atomų.

Ką galime pasakyti apie šią kreivę?

- Kai atstumas lygus d_0, atstojamoji jėga tarp dviejų atomų lygi nuliui. Esant tokiam atstumui stūmos jėgą visiškai kompensuoja traukos jėga. Tai dviejų atomų *pusiausvyros* padėtis. Joje atomai išlieka stabilūs.
- Kai atstumai labai dideli, tarp atomų veikianti jėga artima nuliui. Tačiau traukos jėga pradeda reikštis, kai artėjančios dalelės dar yra gana toli viena nuo kitos.
- Kai atstumas šiek tiek didesnis už d_0, veikia stipri traukos jėga. Norint atomus atskirti, reikia įveikti šią jėgą.
- Atomus suartinus mažesniu atstumu nei d_0, stūmos jėga labai padidėja.

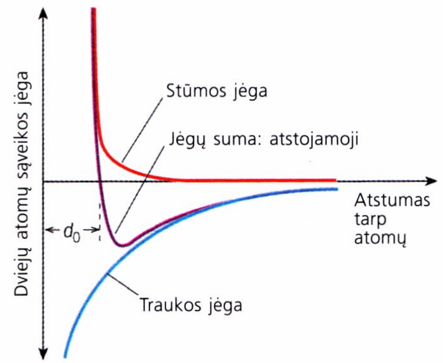
Atomų nutolimas ar suartėjimas panašus į spyruoklės ištempimą ar suspaudimą. Todėl Huko dėsnį (88 psl.) galime taikyti kaip spyruoklėms, taip ir deformuojamiems kietiesiems kūnams.

Jei atitoliname atomus veikdami prieš juos laikančią traukos jėgą, tai turime atlikti darbą, analogiškai darbui, atliekamam keliant kūnus aukštyn gravitaciniame lauke. Kaip gravitaciniame lauke pakeltas kūnas įgyja potencinės energijos, taip ir atitolinami atomai **įgyja potencinės energijos.**

Potencinę energiją, kurią įgyja atomai, kai atstumas tarp jų kinta, galime pavaizduoti grafiškai. Kaip įprasta (žr. 4 skyrių, 64 psl.), laikome, kad potencinė energija lygi nuliui, kai atstumas tarp atomų yra labai didelis. Atomus suartinant, potencinė energija mažėja, kaip mažėja ir kūno potencinė energija jam krintant ant žemės. Kadangi ši energija pradeda mažėti nuo nulio, tai ji turi įgauti vis didesnes neigiamas vertes (žr. 7.7 pav.). Pusiausvyros padėtis d_0, kurioje suminė atomus veikianti jėga lygi nuliui, atitinka minimumą potencinės energijos kreivėje. Labai siauroje d_0 aplinkoje potencinė energija nekinta.

Būkite atidūs! Potencinės energijos minimumas 7.7 paveiksle neatitinka minimumo atstojamosios jėgos, 7.6 paveiksle atvaizduotos violetine kreive. Minimumas jėgos kreivėje atitinka tokį atstumą, kuriame suminė traukos jėga yra didžiausia, o ne tokį, kuriame suminė jėga lygi nuliui.

Jei dar mažinsime atstumą, tai atomai turės judėti prieš stūmos jėgą. Potencinė energija vėl ims didėti. Pagaliau ji pasieks labai dideles teigiamas vertes.



7.6 pav. **Tarp dviejų atomų veikiančios stūmos (raudona) ir traukos (mėlyna) jėgos bei jų suma (violetinė)**

?

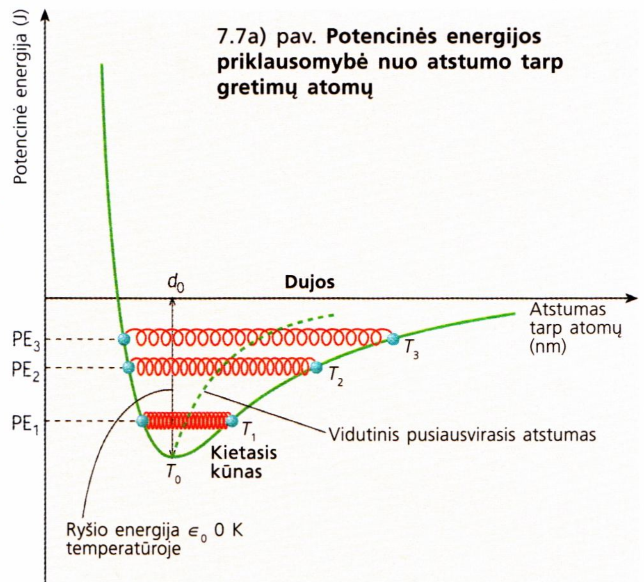
D Perbraižykite 7.6 pav. pavaizduotas kreives kitai porai atomų, tarp kurių stūmos jėga yra silpnesnė, o traukos jėga – stipresnė.

✔

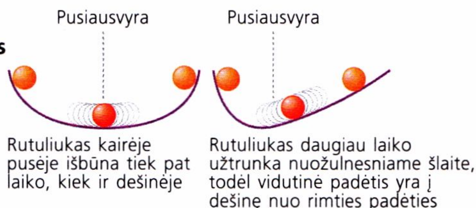
Energijos pokytis lygus jėgai, padaugintai iš nueito kelio. Jei suminė jėga lygi nuliui, energija nekinta.

■ Žr. 1, 2 ir 3 klausimą.

7.7a) pav. **Potencinės energijos priklausomybė nuo atstumo tarp gretimų atomų**



7.7b) pav. **Atomų poros potencinės energijos modelis**



Potencinės energijos kreivė ir medžiagos savybės

Matėme, kad esant pusiausvyrai atstumas tarp dviejų atomų atitinka potencinės energijos minimumą. Nuotolis tarp atomų išlieka d_0, jei temperatūra lygi absoliučiam nuliui. (Vėliau sužinosite, kad absoliutaus nulio praktiškai neįmanoma pasiekti dėl „neapibrėžtumo principo".)

Jei atomams suteiksime tam tikrą energijos kiekį kaitindami juos iki baigtinės temperatūros T_1, tai potencinė energija (PE) padidės iki vertės PE_1 (žr. 7.7a) pav.).

Atomus riša potencinė energija ϵ_0, kurią atitinka žemiausio kreivės taško ordinatė. Atomams suteikta energija verčia juos svyruoti – suartėti ir vėl nutolti, nes veikia stūmos ir traukos jėgos. Atstumą tarp atomų pavaizdavome kaip spyruoklę tarp dviejų taškų kreivėje, esant T_1. Šie du taškai atitinka minimalų ir maksimalų atstumus tarp atomų toje temperatūroje.

Analogiškai galime įsivaizduoti marmurinį rutuliuką, veikiant gravitaciniam laukui osciliuojantį pirmyn ir atgal inde, pavaizduotame 7.7b) pav. Kuo daugiau energijos suteiksime rutuliukui, tuo stipriau jis svyruos ir pasieks vis didesnį aukštį abiejose indo pusėse. Gana parankus toks modelis, pagal kurį rutuliukas svyruoja inde, turinčiame tokią pat formą kaip ir nagrinėtoji dviejų atomų potencinės energijos kreivė. Padidinus atomų temperatūrą, tarkime, iki T_2, po to iki T_3 (tai atitinka potencinės energijos vertės PE_2 ir PE_3), atomai verčiami svyruoti vienas kito atžvilgiu didesnėmis amplitudėmis. Tai parodyta brėžinyje ištemptomis spyruoklėmis ties T_2 ir T_3. Kuo didesnė atomų poros energija, tuo platesniame atstumų ruože jie svyruoja.

Vidutinis nuotolis tarp atomų atitinka šių svyravimų atkarpos vidurį. Nesunku pastebėti, kad kylant temperatūrai vidutinis atstumas tarp atomų didėja, nes potencinės energijos kreivė nesimetriška minimumo atžvilgiu, kaip ir marmurinio rutuliuko trajektorija panašios formos inde. Jei taip vyksta daugeliui atomų, tai vidutiniai atstumai tarp visų atomų padidėja. Kietasis kūnas didėjant temperatūrai *plečiasi.*

Jei atomų temperatūra pakyla tiek, kad potencinė energija pasidaro lygi nuliui, tai atomai gali išsisklaidyti – pasiekiama dujinė būsena. Tam tikroje padėtyje tarp dujinės būsenos ir kietojo kūno (būtų sunku tiksliai pasakyti, kurį tašką mūsų brėžinyje tai atitinka), atomai juda pakankamai laisvai, kad būtų skystoje būsenoje. Potencinės energijos kreivės gylis (ϵ_0) susijęs su medžiagos slaptųjų skystėjimo ir garavimo šilumų suma.

Išnagrinėtos jėgos priklausomybės nuo atstumo kreivės labai naudingos sąveikai tarp atomų aprašyti. Ryšiai tarp atomų kietuosiuose kūnuose yra įvairūs, todėl ir sąveikos formos yra skirtingos. Pagrindiniai kietuosiuose kūnuose pasitaikantys ryšiai apžvelgiami tolesniame išplėstiniame intarpe.

Ryšių rūšys

Joninis ryšys pasitaiko daugelyje kristalinių medžiagų, sudarytų bent jau iš dviejų atomų rūšių, kaip, pavyzdžiui, natrio chloridas – valgomoji druska. Atomai stengiasi užpildyti savo išorinį elektronų sluoksnį. Pavyzdžiui, vienas atomas, natrio chlorido atveju – natrio atomas, praranda elektroną, o kitas, chloro atomas, gauna tą elektroną. Kadangi natrio jonas prarado elektroną, jis įgavo teigiamą krūvį; sakoma, tapo teigiamu jonu. Gavęs elektroną chloras tapo neigiamu jonu. Natrio chlorido kristalas turi būti visur elektriškai neutralus. Vienintelis būdas tą sąlygą patenkinti – natris ir chloras turi išsidėstyti pakaitomis, kaip parodyta 7.8a) pav. Elektrinės jėgos veikia palyginti dideliu atstumu, todėl ryšys nėra kryptingas, tačiau yra stiprus. Skirtingose plokštumose esantiems priešingų ženklų jonams sunku prasilenkti, todėl joniniai kristalai nėra plastiški (žr. 98 psl.). Jie dažniausiai suyra dar nepasiekę tamprumo ribos.

Joniniai kristalai yra blogi elektros laidininkai, kadangi nei patys jonai, nei atskiri elektronai negali laisvai judėti. Vandenyje joniniai kristalai tirpsta: vanduo susilpnina tarp jonų veikiančias elektrines jėgas, ir jonai gali atsiskirti. Tada jie gali judėti ir sudaryti elektros srovę (judėdami jie perneša elektros krūvį).

Esant **kovalentiniam ryšiui,** tarpatominėje erdvėje atomai greičiau dalijasi, negu keičiasi elektronais.

Skirtingai nuo joninio ryšio, kovalentinis ryšys yra labai kryptingas. Tokiais ryšiais susietos molekulės išlaiko tam tikrą formą. Deguonis O_2 yra molekulė su kovalentiniu ryšiu. Abiem deguonies

atomams trūksta po du elektronus išoriniuose sluoksniuose, ir, kaip parodyta 7.8b) pav., jie abu bendrai dalijasi keturiais elektronais (kiekvienas atiduoda po du elektronus bendram „naudojimui").

Esant kovalentiniam ryšiui gali susidaryti labai didelės „molekulės". Pavyzdžiui, deimantas, parodytas 7.8c) pav. Anglis savo išoriniame sluoksnyje turi keturis elektronus ir bendrai naudodamasi dar keturiais elektronais su keturiais kitais anglies atomais, sudaro vientisą struktūrą. Tie keturi ryšiai simetriškai išsidėstę erdvėje ir vadinami tetraedriniais ryšiais.

Silicis ir germanis savo išoriniuose sluoksniuose irgi turi po keturis elektronus (anglis, silicis ir germanis yra iš periodinės elementų lentelės ketvirtosios grupės, žr. 18.2 lentelę), todėl jų ryšiai vienodi. Išorinių elektronų silicyje ir germanyje išsidėstymas nulemia jų puslaidininkines savybes. Remiantis šiomis savybėmis, buvo sugalvoti puslaidininkiniai prietaisai ir kuriama didelės elektronikos pramonės dalis. Priešingai nei joniniai junginiai, kovalentinės medžiagos nelaidžios vandeniniame tirpale.

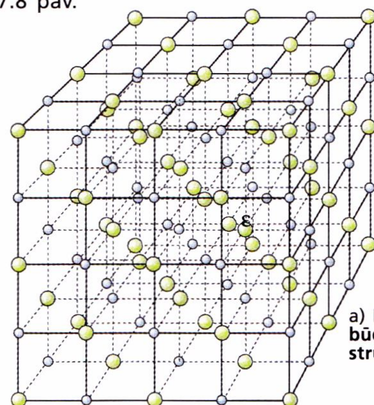
Metaluose kiekvienas atomas turi po vieną ar daugiau išorinių **delokalizuotų** elektronų, kurie gali laisvai judėti tarp atomų. Metalą galime atvaizduoti kaip milžinišką teigiamai įelektrintų jonų struktūrą elektronų jūroje (žr. 7.8d) pav.). Tai – **metalinis ryšys.**

Atrodytų šie jonai turi stumti vienas kitą ir išsisklaidyti. Taip neįvyksta. Sąveika tarp elektronų ir jonų sukuria besipriešinančią išsisklaidymui traukos jėgą. Kodėl taip yra, fizikai ilgai suko galvas, kol buvo pasiūlyta nauja teorija, vadinama kvantine fizika (žr. 17 skyrių 2-oje d.).

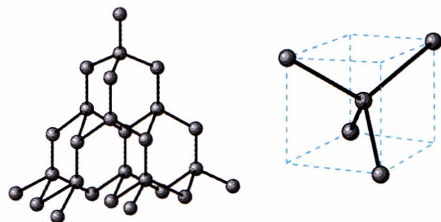
Elektronų gebėjimas laisvai judėti nulemia gerą metalų elektrinį laidumą. Sąveika tarp daugelio jonų ir elektronų „jūros" nėra kryptinga. Tačiau jonai išlieka tam tikrose pastoviose padėtyse, dažnai tankioje sanglaudoje. Jei metalą veikia tempimo ar šlyties jėgos, jonų plokštumos pasislenka viena kitos atžvilgiu. Taigi, kaip matėme 5 skyriuje (97 psl.), metalai yra plastiški.

Netgi neutralūs atomai šiek tiek traukia vienas kitą. Atomai sudaryti iš teigiamai įelektrintų protonų branduolyje ir elektronų, judančių branduolį gaubiančiame debesyje, kurio forma nuolat kinta. Vienodų atomų poroje tarp vieno atomo teigiamų ir neigiamų krūvių ir kito atomo teigiamų ir neigiamų krūvių veikia silpna momentinė jėga (žr. 7.8e) pav.). Nors judant elektronams ši jėga kinta, jos vidurkis laiko atžvilgiu atitinka trauką, vadinamą **van der Valso** (*van der Waals*) **ryšiu,** kuri veikia tarp visų atomų ir molekulių.

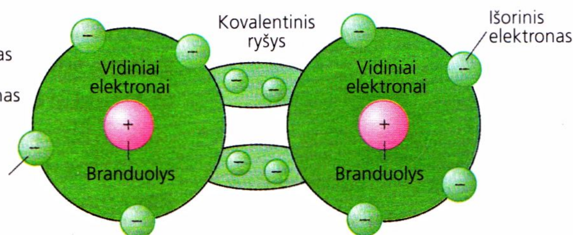
7.8 pav.



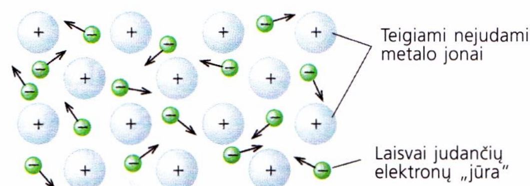
a) Natrio chloridas, būdinga joninė struktūra



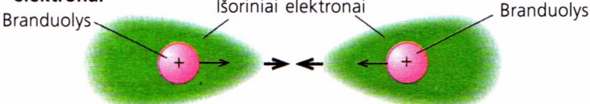
c) Tetraedrinis kovalentinis ryšys deimante. Pastebėkite panašumą į ledo struktūrą 7.3a) pav.



b) Kovalentinis ryšys deguonies molekulėje; bendrai naudojami išoriniai elektronai



d) Metalinis ryšys; pavaizduoti metalo jonai ir juos supantys elektronai



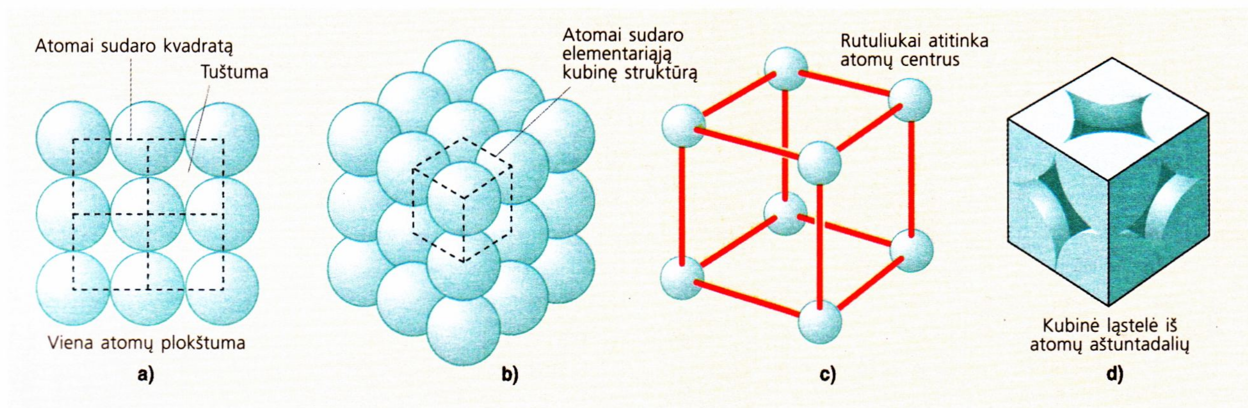
e) Van der Valso ryšys tarp neutralių atomų

4 KRISTALŲ STRUKTŪROS

Rutuliukų dėliojimas sluoksniais yra panašus į atomų dėstymą. Galutinė struktūra priklauso nuo to, kaip išdėstyti sluoksniai, ir nuo to, ar šie sluoksniai sudaryti iš vienodo, ar iš skirtingo dydžio rutuliukų. Medžiagos, sudarytos iš taisyklingai išrikiuotų atomų, vadinamos kristalais. Jie dažnai turi plokščias sieneles, kurios atitinka tam kristalui būdingas atomų plokštumas. Daugelis kristalų gali būti **skaldomi,** t. y. stipriai smogus aštria briauna galima perskelti kristalą išilgai kristalinės plokštumos ir gauti du plokščius paviršius. Dėl šios savybės deimantai ir kiti brangakmeniai traukia akį žėrinčiais paviršiais ir naudojami papuošalams.

E Koks atomų skaičius tenka vienai kubinei ląstelei elementarioje kubinėje struktūroje?

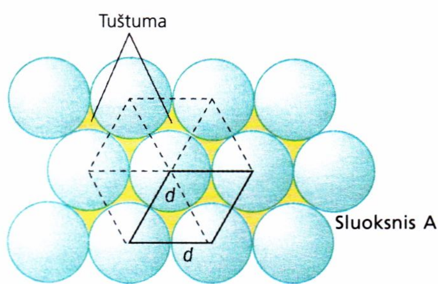
Elementarioji kubinė struktūra



7.9 pav. **Skirtingi elementariosios kubinės struktūros vaizdavimo būdai**

Ir toliau įsivaizduokime, kad atomai – tai standūs rutuliukai. Juos galima išdėstyti taip, kad viename sluoksnyje jie liestųsi sudarydami kvadratinį dėstinį (7.9a) pav.). Atkreipkite dėmesį, kad apie kiekvieną tuštumą yra keturi atomai. Tada virš pirmojo sluoksnio galime sudėlioti antrąjį ir taip toliau (žr. 7.9b) pav.). Tokia trimatė struktūra vadinama **elementariąja kubine** struktūra.

Iš 7.9b) pav. pavaizduotos struktūros atskyrę aštuonis atomus, sumažinę jų matmenis, o centrus sujungę linijomis gausime 7.9c) pav. parodytą vaizdą. Atkreipkite dėmesį, kad kiekvienas atomas bus aštuonių kubų viršūnėse: vieno, atvaizduoto 7.9b), ir dar septynių kitų. 7.9d) paveiksle tie patys atomai (rutuliukai) kaip 7.9b) pavaizduoti kitu būdu. Aišku, kad kiekviename kampe esanti atomo dalis yra lygi atomo aštuntadaliui.



7.10 pav. **Tanki rutuliukų sanglauda viename sluoksnyje**

Tankiosios sanglaudos struktūros

Rutuliukus 7.9a) paveiksle galima ir glaudžiau supakuoti. 7.10 pav. atvaizduotas kitoks rutuliukų išdėstymas viename sluoksnyje. Čia antroji suglaustų atomų eilė yra paslinkta pirmosios atžvilgiu. Trečioji eilė atitinka pirmąją. Palyginę su 7.9a) pav. atkreipkite dėmesį, kad aplink tuštumą dabar yra tik trys atomai, nors atstumas iki artimiausių atomų centrų išliko toks pat, lygus atomo skersmeniui. Galiausiai paaiškėja, kad 7.10 paveiksle ploto vienetui tenka daugiau atomų.

F Rutuliukų skersmenys lygūs *d*. Palyginkite supakavimo tankį elementariosios kubinės ir tankios sanglaudos struktūrų vienoje plokštumoje.

Patarimas: raskite plotus kvadrato, jungiančio keturių atomų centrus 7.9a) pav., ir lygiagretainio, jungiančio keturis atomus 7.10 pav.

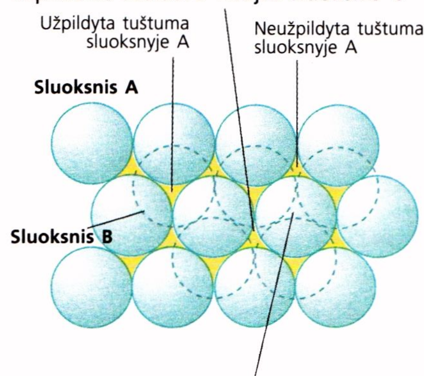
Tankios sanglaudos struktūros: heksagoninė ir centruoto paviršiaus kubinė

Ant 7.10 pav. atvaizduoto sluoksnio galime sustatyti reguliarią tankios sanglaudos struktūrą dviem skirtingais būdais:

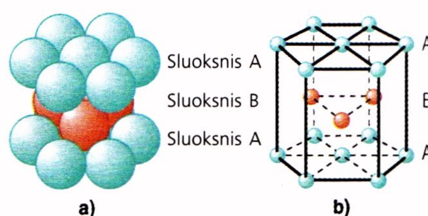
1 būdas

- Pirmąjį tankios sanglaudos struktūros, sudarytos iš rutuliukų (atomų), sluoksnį pažymėkime A. Atkreipkite dėmesį, kad kiekvienas rutuliukas liečia šešis kitus (artimiausius kaimynus) ir yra apsuptas šešių tuštumų (7.11 pav.).
- Dabar pradėkime statyti trimatę struktūrą. Sekančios plokštumos rutuliukus dėliokime virš tuštumų. Atkreipkite dėmesį, kad, nors antrojo sluoksnio dėstinys glaudus, šio sluoksnio rutuliukų centrai bus tik virš pusės pirmojo sluoksnio tuštumų. Šiame etape nesvarbu, kurią pusę tuštumų panaudosime. Pažymėkime šį sluoksnį B.
- Po to dėliokime trečią rutuliukų sluoksnį. Ir vėl galime užpildyti tik pusę tuštumų. Šiuo atveju jų pasirinkimas yra reikšmingas.
- Užpildydami vieną dalį tuštumų, galime trečiojo sluoksnio rutuliukus dėlioti tiesiai virš pirmojo rutuliukų sluoksnio. Todėl žymime šį sluoksnį, kaip ir pirmąjį sluoksnį, A. Įsidėmėkite tuštumas sluoksnyje B (7.11 pav.), virš kurių išdėlioti trečiojo sluoksnio rutuliukai.

Galime atvaizduoti heksagoninę gardelę, susidariusią trijuose sluoksniuose, kaip parodyta 7.12a). 7.12b) pav. parodytas įprastinis heksagoninės gardelės vaizdas su sumažintais rutuliukais (atomais). Matyt, kad šį sluoksnių išsidėstymą ABABAB... galėtume tęsti. Tokį išsidėstymą vadiname **heksagonine tankios sanglaudos struktūra.**



7.11 pav. **Du skirtingi būdai uždėti trečiąjį sluoksnį tankioje sferų sanglaudoje**

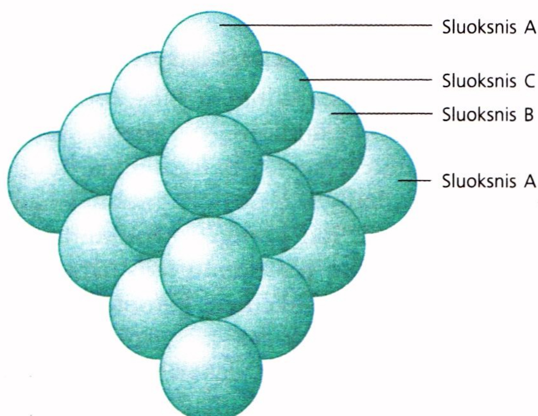


7.12 pav. **Heksagoninė tanki sanglauda**

2 būdas

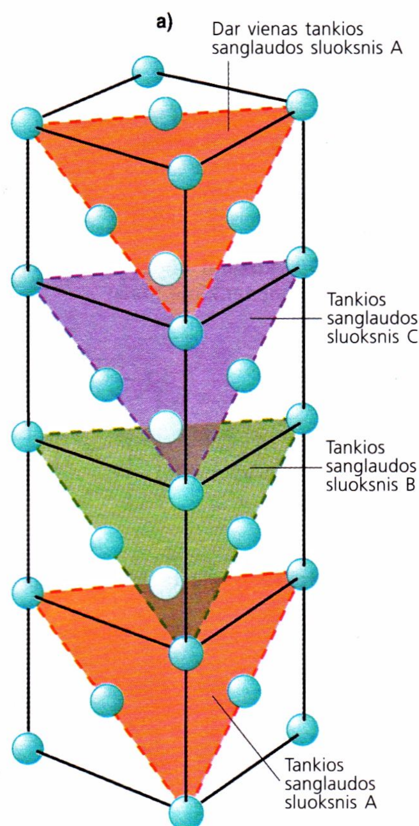
- Grįžkime prie trečiojo sluoksnio dėliojimo 7.11 pav. Jau turime sluoksnius A ir B. Dabar pasirinkime kitą pusę tuštumų, negu praeitą kartą, t. y. trečiąjį rutuliukų sluoksnį dėkime ne ties sluoksnio A rutuliukais, taip pat ir ne ties B sluoksnio rutuliukais. Pažymėkime šį sluoksnį C. Tada dedame ketvirtąjį sluoksnį. Vėl turime tuštumų pasirinkimą, tačiau pasirenkame tokią rutuliukų padėtį, kad jie atsidurtų ties sluoksnio A atomais. Taip gauname naują A tipo sluoksnį. Pakuodami toliau gausime išsidėstymą ABCABCABC... 7.13 pav. parodytas toks sluoksniavimas sudarant piramidę nuo trikampio pagrindo. Tai

■ Žr. 4 klausimą.

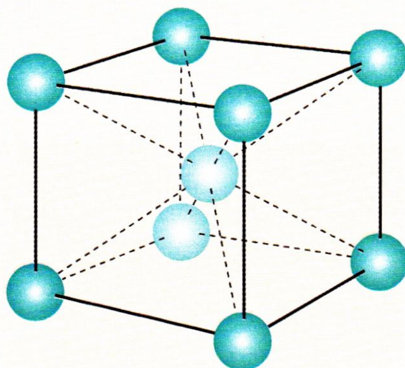


7.13 pav. **Centruoto paviršiaus kubinė struktūra kaip piramidė ant trikampio pagrindo**

G Panagrinėję atomų priklausymą gretimoms kubinėms ląstelėms nustatykite, kiek atomų tenka vienai kubinei ląstelei centruoto paviršiaus kubinėje struktūroje.



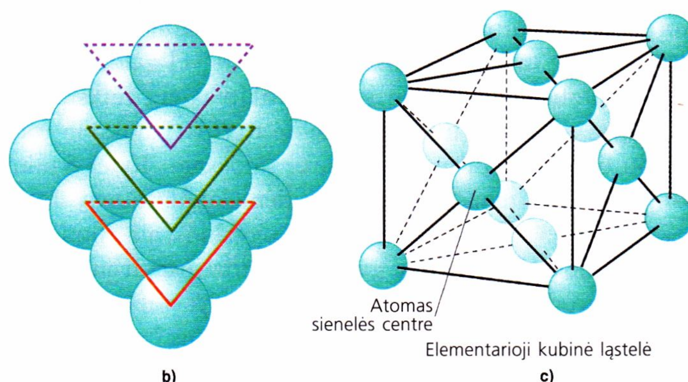
7.14 pav. **Centruoto paviršiaus kubinė struktūra; tankios sanglaudos sluoksniai paryškinti**



7.15 pav. **Centruoto tūrio kubinė struktūra**

irgi yra tankios sanglaudos struktūra; ji vadinama **centruoto paviršiaus kubine struktūra.**

Kaip galime spręsti iš pavadinimo, centruoto paviršiaus kubas turi atomus kubo kampuose ir kiekvienos sienelės centre (žr. 7.14c) pav.). Mūsų aprašytą tankios sanglaudos struktūrą galima nagrinėti kaip centruoto paviršiaus ląstelių seką pakreipiant tankios sanglaudos plokštumas. Šį ryšį turėtumėte įžvelgti 7.14a) ir 7.14b) paveiksluose. Į tankiosios sanglaudos plokštumas patenka trys diagonalioje plokštumoje esančios kubo viršūnės. Pasistenkite įsivaizduoti, kaip tokioje plokštumoje esantį atomą supa šeši gretimi atomai iš tos pačios plokštumos ir po tris atomus iš dviejų gretimų plokštumų. 7.14b) pav. pavaizduotos piramidės visas išorines sienas sudaro tankiosios sanglaudos atomų plokštumos.



Centruoto tūrio kubinė struktūra

Kita plačiai paplitusi struktūra yra vadinama **centruoto tūrio kubine,** kadangi greta atomų kubo viršūnėse yra ir atomas kubo centre (7.15 pav.). Geležis turi tokią struktūrą iki 800 °C temperatūros; pasiekus šią temperatūrą ji virsta centruoto paviršiaus kubine. Tai pavyzdys, kai kūnas keičia savo fazę, tačiau išlieka kietuoju kūnu. Geležį kaitinant iki daugiau kaip 800 °C ir staiga ataušinus vandenyje ji jau negalės grįžti atgal į centruoto tūrio struktūrą. Centruoto paviršiaus geležies forma pasižymi kitokiomis savybėmis nei centruoto tūrio forma, pavyzdžiui, ji yra labai trapi. Iš geležies su anglies priemaišomis gaunamas plienas. Tokie geležies savybių pokyčiai yra be galo svarbūs metalurgijos mokslui bei geležies ir plieno pramonei.

Kristalų struktūros nustatymas

Kristalų struktūrą išsiaiškiname juos zonduodami spinduliuote. Atstumas tarp atomų sluoksnių yra maždaug 0,5 nm, todėl mums reikia spinduliuotės, kurios bangos ilgis būtų panašaus dydžio. Rentgeno spinduliai yra elektromagnetinės bangos, kurių bangos ilgis yra apie 1 nm. Kai Rentgeno spinduliai krinta į kristalą, jie difraguoja nuo atomų plokštumų taip pat, kaip šviesa difraguoja siaurame plyšyje ar difrakcinėje gardelėje.

Maksas fon Lavė (*Max von Laue*) pirmasis pastebėjo šį efektą 1912 metais. Difrakcinis vaizdas užfiksuojamas fotografinėje juostelėje (7.16 pav.), kur jis matomas kaip taškų grupės. Panašų vaizdą galime gauti praleidę lazerio spindulį pro dvi statmenai sukryžiuotas difrakcines gardeles.

Kristale yra daug lygiagrečių atominių plokštumų, kurios ir sukelia difrakcijos reiškinį, kaip ir daugelis rėžių difrakcinėse gardelėse. Atstumus tarp šių plokštumų galima apskaičiuoti išmatavus atstumus tarp taškų fotografinėje juostoje.

Šiais laikais Rentgeno spinduliams fiksuoti naudojamos ne juostelės, o kietakūniai jutikliai. Išmatuotas spindulių intensyvumas paverčiamas skaitmeniniu ir saugomas kompiuterio atmintyje, o kompiuterio duomenų apdorojimo programos apskaičiuoja kristalo struktūrą ir atomų padėtis plokštumose. Net tokių sudėtingų molekulių kaip DNR struktūra buvo išaiškinta taikant Rentgeno spindulių analizę.

Kristalinės struktūros tyrimams vietoj Rentgeno spindulių galima naudoti elektronus. Elektroniniais mikroskopais gaunami vaizdai yra panašūs į vaizdus, gautus optiniais mikroskopais. Tačiau elektroninius mikroskopus galima panaudoti ir taip, kad jie sukurtų difrakcinius vaizdus, kadangi elektronai gali elgtis kaip bangos. (Apie dalelių ir bangų dualizmą daugiau sužinosite 2-oje d. 17 sk.)

Kitų kietųjų kūnų struktūros

Dauguma medžiagų turi tvarkiąją kristalinę struktūrą, tačiau yra ir tokių, kurios neturi. Tokios medžiagos vadinamos **amorfinėmis,** t. y. „be formos". Sinonimiški apibūdinimai yra **stiklingosios medžiagos** ir **kietasis skystis.** Taigi nenuostabu, kad įprastas stiklas yra amorfinė medžiaga. Jis sudarytas iš silicio oksido (SiO_2) su kitų oksidų priemaišomis.

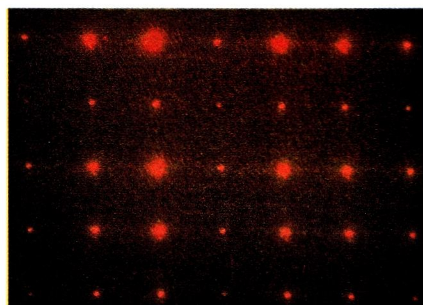
Stiklo difrakciniame vaizde neišsiskiria taškai. Jame matyti pora labai išplitusių žiedų, kurie atsiranda dėl to, kad vidutiniai atstumai tarp pačių artimiausių ir sekančių artimiausių gretimų atomų yra skirtingi. Kai atstumai didesni, išsidėstymas yra netvarkus.

Stiklas yra kietas bei trapus, ir paviršiaus įtrūkimai jį labai silpnina (žr. 107 psl.). Šia savybe plačiai naudojasi stiklo raižytojai. Jie įbrėžia paviršių ir laužia stiklą per šį rėžį. Tuo galime įsitikinti padarę nedidelį bandymą: stiklo strypelį, kurio abu galai padėti ant atramų, veikime apkrova ties strypelio viduriu (7.18 pav.). Apkrovą didinkime tol, kol strypelis sulūš. Procedūrą pakartokime su stiklo strypeliu, kurio paviršius apatinėje dalyje įrėžtas. Dabar strypelis lūžta esant daug mažesnei apkrovai.

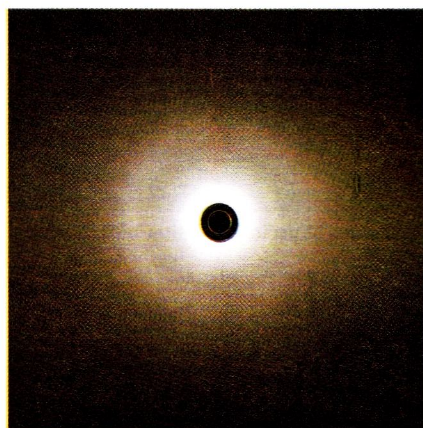
Kaitinamas stiklas minkštėja, ir tada jam galima suteikti norimą formą, kaip tai daro stiklapūčiai. Jį galima ištempti į labai plonas gijas, kuriomis sklinda šviesos bangos šviesolaidinėse ryšių linijose. Nors stiklas nėra skystis, jis šiek tiek takus. Labai senų stiklinių langų apačioje stiklas storesnis nei viršuje dėl labai silpno tekėjimo veikiant Žemės gravitaciniam laukui.

Polimerai sudaryti iš atomų grandinėlių, susietų į ilgas molekules. Molekulės stuburą dažniausiai sudaro seka iš anglies atomų, kurie kovalentiniais ryšiais susieti su kitų rūšių atomais. Polimerų pavyzdžių gausu namuose. Polietilenas (sudarytas iš polieteno molekulių), nailonas, polivinilchloridas – tai tik keletas pavyzdžių. Molekulinės grandinėlės gali susisukti ir susipinti. Kai kurios polimero sritys gali būti visiškai amorfinės, tuo tarpu kitas gali sudaryti molekulės, išsidėsčiusios į tvarkią (kristalinę) struktūrą. Guma yra kaip tik toks polimeras. 5-ame skyriuje (99 psl.) aprašyta, kaip gumos molekulės įprastinėje būsenoje yra labiau persipynusios, negu esant įtempimui.

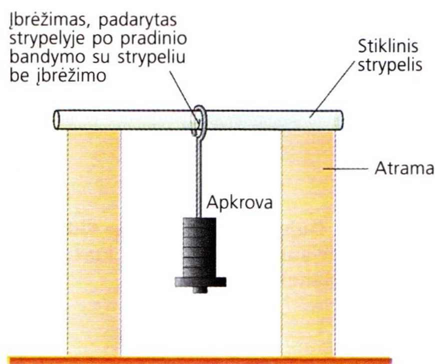




7.16 pav. **Lavė difrakcinis vaizdas (viršuje). Palyginkite jį su difrakciniu vaizdu, gautu kryžmai (stačiu kampu) sustačius dvi difrakcines gardeles (apačioje)**



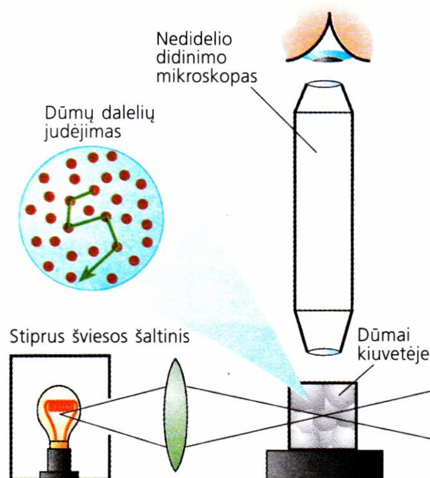
7.17 pav. **Stiklo (amorfinės medžiagos) Rentgeno spindulių difrakcinis vaizdas**



7.18 pav. **Stiklinio strypelio stiprumo bandymas**

Yra įvairių polimerų rūšių. **Termoreaktinguosius polimerus** galima lieti: pašildyti jie įgauna reikiamą formą ir ją išlaiko atšaldžius. Vėl kaitinant, jie greičiau suyra nei minkštėja ir deformuojasi. Kiti, vadinamieji **termoplastikai,** pakartotinai šildant tampa lankstūs, ir galų gale ima tirpti.

6 SKYSČIAI

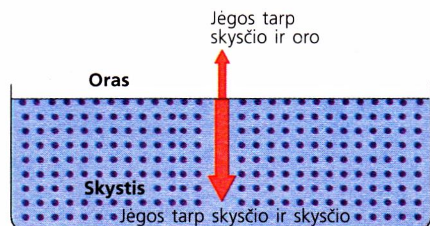


7.19 pav. **Brauno judėjimo demonstravimas**

Matėme, kad tarp molekulių skystyje nėra tolimosios tvarkos. Skysčio rentgenograma panaši į amorfinio kūno, pavyzdžiui, stiklo. Molekulės juda viena kitos atžvilgiu ir keičiasi vietomis. Dėl šios molekulių savybės – judėti vienai pro kitą – skystis yra takus. Veikiant šlyties jėgoms skystis neišlaiko savo formos, nors gali atlaikyti gniuždymo (hidrostatines) jėgas, nes savo tūrį jis išlaiko.

Tuo, kad skysčio molekulės juda, galime įsitikinti stebėdami **Brauno (*Brown*) judėjimą.** Botanikas Robertas Braunas pirmasis 1827 metais aptiko šį efektą, stebėdamas vandenyje plūduriuojančias žiedadulkes. Žiedadulkių masė yra pakankamai maža, kad jos judėtų smūgiuojant nematomoms vandens molekulėms. Panaši situacija pavaizduota 7.19 pav. Panašiai dūmų dalelytės juda ore, kadangi dujų molekulės susiduria su gretimomis molekulėmis.

Paviršiaus įtempimas



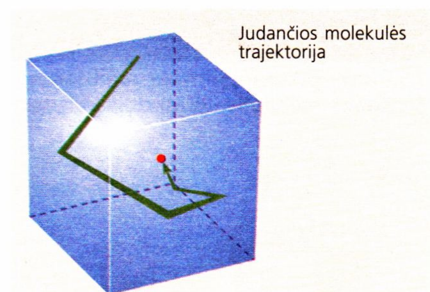
7.20 pav. **Skysčio paviršius veikia kaip oda**

Skysčiai elgiasi taip, tarsi jų paviršių dengtų plonytė odelė. Pavyzdžiui, ant vandens paviršiaus „odelės“ galima padėti smeigtuką, o kai kurie vabzdžiai gali vaikščioti tvenkinio paviršiumi.

Tai įmanoma dėl **paviršiaus įtempimo:** paviršiuje molekulės yra labiau nutolusios viena nuo kitos nei giliau esančios molekulės, todėl traukos jėgos tarp gretimų molekulių skysčio paviršiuje yra didesnės nei jėgos tarp giliau esančių molekulių (žr. 7.20 pav.).

Prie skysčių dar grįšime ir panagrinėsime kitas jų savybes. Pavyzdžiui, 8 skyriuje išsiaiškinsime keliamosios jėgos ir skysčių tekėjimo svarbą transporto priemonių pavidalui, o 14 skyriuje daugiau sužinosime apie šiluminės energijos pernašą skysčiuose.

7 DUJOS

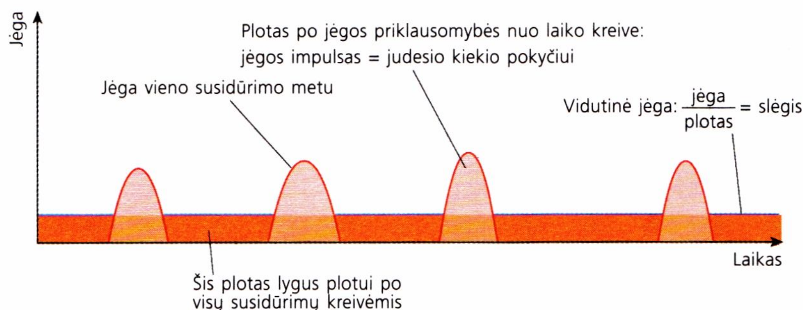


7.21 pav. **Dujų molekulės juda dideliais greičiais ir susiduria su indo, kuriame jos yra, sienelėmis**

Matėme, kad atomai kietuosiuose kūnuose svyruoja, bet nejuda vienas pro kitą. Skysčiuose atomai ar molekulės gali judėti vieni pro kitus, tik savo padėtis jie keičia lėtai. Tuo tarpu dujose atomai ir molekulės labai sparčiai juda dideliais nuotoliais. Šis judėjimas yra netvarkus.

Judėdamos dideliais greičiais, dujų molekulės (arba atomai) nuolat susiduria su indo, kuriame jos yra, sienelėmis (7.21 pav.). Molekulėms atsimušus nuo sienelių, pakinta jų judesio kiekis.

Kiekviena molekulė per labai mažą laiko tarpsnį paveikia sienelę nedidele jėga (7.22 pav.). Visos šios silpnos jėgos susideda, ir didelis tokių susidūrimų skaičius veikia sienelę atstojamąja jėga, kurią galima išmatuoti. Jei laikysime, kad molekulės juda *visomis kryptimis vienodai,* tai sienelės ploto vienetą veikianti jėga bus vienoda į visas indo sieneles. Ši ploto vienetui tenkanti jėga yra dujų **slėgis,** ir jis yra vienodas visomis kryptimis.



7.22 pav. **Jėgų, atsirandančių daugeliui dujų molekulių susiduriant su indo sienelėmis, vidurkinimas**

Idealiųjų dujų būvio lygtis

Septynioliktojo amžiaus viduryje Robertas Boilis (*Robert Boyle*) eksperimentiškai nustatė:

Esant pastoviai temperatūrai, pastovios masės dujų tūris yra atvirkščiai proporcingas veikiančiam slėgiui.

Tai yra, jei temperatūra ir masė pastovios, tai:

$$\text{slėgis} \sim \frac{1}{\text{tūris}}$$

Jei p yra dujų slėgis, o V – jų tūris, tai, esant pastovioms temperatūrai ir masei,

$$p \sim \frac{1}{V} \quad \text{arba} \quad pV = \text{const} \qquad \text{[I dėsnis]}$$

Šis dėsnis vadinamas **Boilio dėsniu** ir galioja, kai dujų slėgis nėra didelis. Be Boilio dėsnio, yra dar du dujų dėsniai.

Slėgio dėsnis:

Pastovios masės dujų slėgis, esant pastoviam tūriui, yra proporcingas temperatūrai, išmatuotai Kelvino skalėje.

Tai yra, jei tūris ir masė pastovūs, tai:

$$\text{slėgis} \sim \text{temperatūra}$$

$$p \sim T \quad \text{arba} \quad \frac{p}{T} = \text{const} \qquad \text{[II dėsnis]}$$

Tai – fundamentalus sąryšis idealiosioms dujoms (realiosioms dujoms galioja, kai slėgis nėra didelis). Atkreipkite dėmesį, kad kol kas mes tiksliai neapibrėžėme, ką vadiname temperatūra. Papildomos informacijos srityje 155 psl. aprašyta, kaip nustatomos temperatūros skalės.

Dar vienas dėsnis vadinamas **Šarlio** (Charles) **dėsniu**:

Pastovios masės dujų tūris, esant pastoviam slėgiui, yra proporcingas temperatūrai, išmatuotai Kelvino skalėje.

Tai yra, jei tūris ir masė pastovūs, tai:

$$\text{tūris} \sim \text{temperatūra}$$

$$V \sim T \quad \text{arba} \quad \frac{V}{T} = \text{const} \qquad \text{[III dėsnis]}$$

BOILIS IR ŠARLIS – DUJŲ DĖSNIŲ KŪRĖJAI

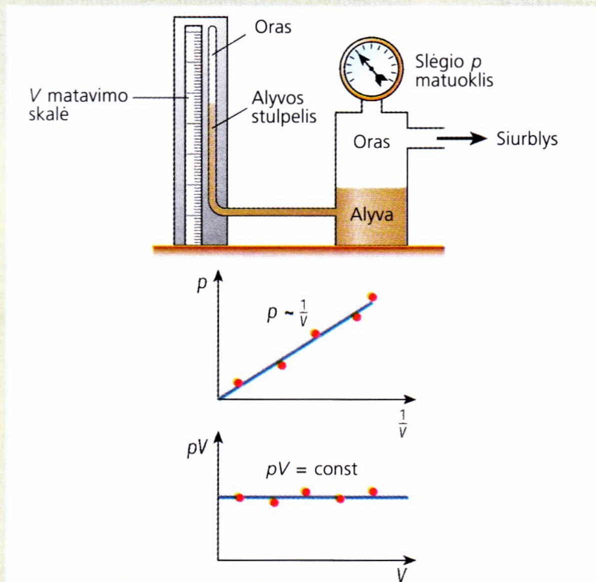
Robertas Boilis (*Robert Boyle,* 1627–1691) buvo jauniausias Korko grafo sūnus. Jis buvo mokomas privačiai, o prieš išvykdamas į didžiąją kelionę po Europą, mokėsi Etono koledže. Pagrindinė jo darbo sritis buvo chemija. Manoma, kad būtent jo darbų dėka chemija susiformavo kaip atskiras mokslas.

Dirbdamas Oksforde jis patobulino Huko sukonstruotą oro siurblį ir įrodė, kad sunkio jėgos veikiami kūnai vakuume krinta tuo pačiu greičiu. Jis ne tik paskelbė savo atrastą dujų dėsnį, bet ir pasiūlė cheminių elementų idėją. Jis klaidingai manė, kad netauriuosius metalus įmanoma paversti auksu, o jo bandymai vienus metalus versti kitais paskatino atšaukti Anglijos įstatymą, draudžiantį gaminti auksą ir sidabrą iš kitų medžiagų.

Žakas Šarlis (*Jacques Charles,* 1746–1823) iš pradžių dirbo tarnautoju valstybinėje įstaigoje. Šis prancūzų fizikas domėjosi oreivyste, ir dėl šio savo pomėgio ėmėsi dujų tyrimų. 1783 metais pirmą kartą pakilo vandenilio pripildytu balionu. Po keleto metų jis suformulavo savo įžymųjį dėsnį ir nusiuntė jį Gei-Liusakui (*Gay-Lussac*), kuris atliko tikslesnius bandymus ir patvirtino dėsnį. Todėl Prancūzijoje šis dėsnis vadinamas Gei-Liusako vardu. [Lietuviškoje terminologijoje idealiųjų dujų dėsnis, kai T = const, dažniausiai vadinamas Boilio ir Marioto vardu, kai V = const, – Gei-Liusako, o kai p = const, – Šarlio vardu. (*Vert. past.*)]

Boilio dėsnio demonstravimas

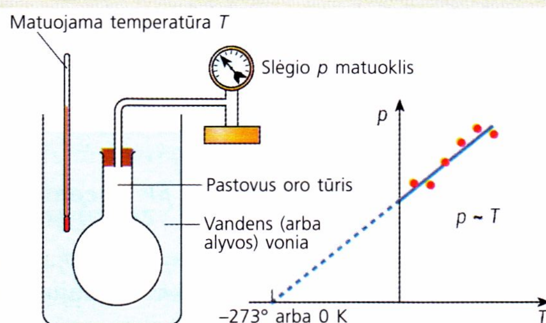
Kaip parodyta 7.23 pav., virš alyvos stulpelio uždarajame stiklinio vamzdelio gale yra nedidelis kiekis oro. Vamzdelio tūris yra sukalibruotas. Kitas vamzdelio galas susisiekia su indu, kuriame yra oro. Oro slėgį inde, tuo pačiu ir slėgį, veikiantį alyvą, galima keisti kojiniu oro siurbliu. Pakeitus slėgį reikia palaukti, kol dujos pasieks šiluminę pusiausvyrą su pastovios temperatūros aplinka. Norint pademonstruoti Boilio dėsnį, reikia atidėti p priklausomybę nuo $1/V$ arba pV nuo V.



7.23 pav. **Boilio dėsnio demonstravimas**

Gei-Liusako dėsnio demonstravimas

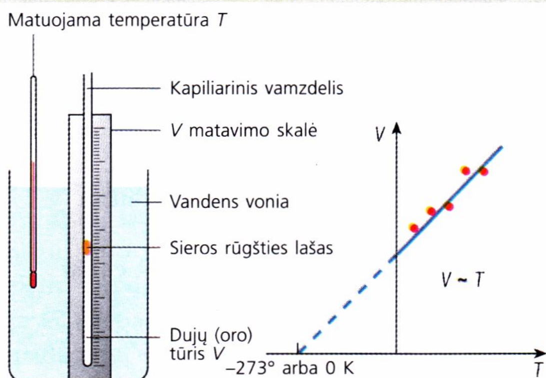
Kaip parodyta 7.24 pav., oro pripildyta kolba yra sujungta su slėgio matuokliu. Kolba įstatyta į vandens vonią (arba alyvos vonią, jei kaitinama iki aukštesnių temperatūrų) ir matuojama, kaip kinta slėgis kintant temperatūrai.



7.24 pav. **Gei-Liusako dėsnio demonstravimas**

Šarlio dėsnio demonstravimas

Kaip parodyta 7.25 pav., nedidelis dujų kiekis (tinka ir oras) kalibruotame kapiliariniame vamzdelyje yra uždarytas skysčio lašu (dažniausiai naudojamas koncentruotos sieros rūgšties lašas, kad dujos išliktų sausos). Kapiliarinis vamzdelis įstatytas į vandens vonią. Keičiant vandens vonios temperatūrą, matuojamas dujų stulpelio aukštis, kuris yra proporcingas dujų tūriui.



7.25 pav. **Šarlio dėsnio demonstravimas**

Iš šių trijų dėsnių gauname apibendrintą **idealiųjų dujų dėsnį.** Esant pastoviai idealiųjų dujų masei:

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

arba

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

Indeksas 1 atitinka pradines idealiųjų dujų sąlygas, o indeksas 2 – pasikeitusias sąlygas.

Jei realioms dujoms galioja universalusis idealiųjų dujų dėsnis, tai jos elgiasi kaip idealiosios dujos. Ši lygtis galioja, kai tarp dujas sudarančių atomų ar molekulių neveikia nei traukos, nei stūmos jėgos. Realiosios dujos plėsdamosi dažniausiai vėsta (šia savybe pasinaudojama, pavyzdžiui, labai žemoje temperatūroje skystinant dujinį helį). Tačiau idealiosios dujos nevėsta, jei joms leidžiama laisvai plėstis (t. y., jei leidžiama plėstis į vakuumą). Idealiųjų dujų neįmanoma suskystinti.

H Paaiškinkite, kodėl dujų slėgis turi būti nedidelis, kad joms galiotų idealiųjų dujų dėsnis.

Idealiųjų dujų temperatūros skalė – Kelvino temperatūros skalė

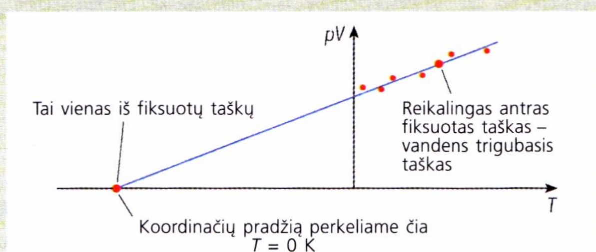
Matėme, kad galima užrašyti $p_1V_1/T_1 = p_2V_2/T_2$, kur indeksais 1 ir 2 pažymėtos pradinės ir pakitusios idealiųjų dujų sąlygos. Kitaip galime užrašyti $pV \sim T$. Dabar paaiškinsime, kaip galima tiksliai graduoti temperatūrą.

Matuojame pV, keisdami T (ir matuodami termometru) ruože, kuriame dujos elgiasi kaip idealiosios. Gauname šį proporcingumą atitinkančią tiesę (7.26 pav.). Grafikas atitinka tiesės lygtį:

$$y = mx + c,$$

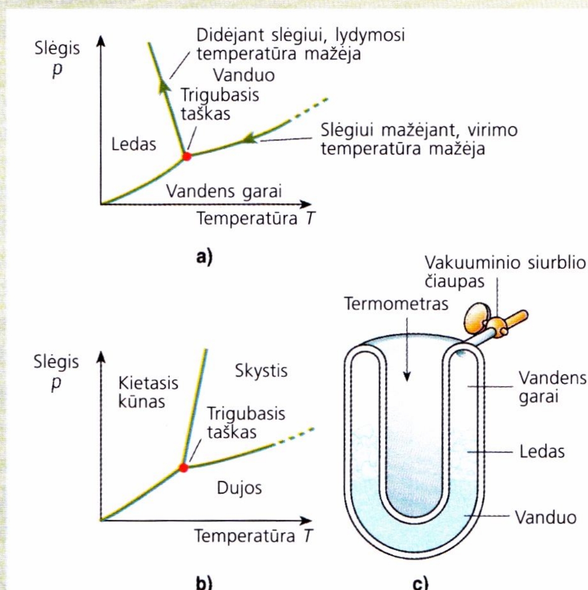
kur m yra posvyris, o c – konstanta.

Gradavimo kreivei gauti pasinaudojame tiesine priklausomybe ir pratęsiame tiesę iki koordinačių pradžios $pV = 0$, $T = 0$. Tariame, kad $c = 0$, ir apibrėžiame vieną fiksuotą tašką.



7.26 pav. **Idealiosioms dujoms *pV* yra proporcingas *T***

Gradavimo tiesei gauti pakanka nustatyti dar vieną fiksuotą tašką. Šis taškas turi būti toks, kad galėtų jį atkartoti bet kuris mokslininkas bet kurioje Žemės vietoje. Tokiu fiksuotu tašku pasirinktas trigubasis vandens taškas – unikali temperatūra, kurioje vandens garai, skystas vanduo ir ledas yra pusiausvyroje (žr. 7.27c) pav.). Eksperimentiškai toks taškas gaunamas naudojant trigubojo taško kiuvetę, pavaizduotą 7.27c) pav. Įsiurbus orą, slėgį kiuvetėje sudaro vien vandens garai. Šis slėgis lygus 0,61 kPa – kur kas mažesnis nei atmosferos slėgis (101,4 kPa). Dėl istorinių priežasčių, susijusių su ankstesniais šimto laipsnių Celsijaus skalės apibrėžimais, laikoma, kad šis trigubasis taškas Kelvino skalėje atitinka 273,16 temperatūros vienetų **kelvinų** (K). Celsijaus skalėje absoliutųjį „nulį“ atitinka vertė –273,16 °C, o trigubo taško temperatūra lygi 0 °C, taigi vieną kelviną atitinkantis temperatūrų skirtumas yra lygus vieno Celsijaus laipsnio vertei.



7.27 pav. **Fazinė diagrama a) vandeniui, b) daugumai kitų medžiagų. c) Trigubojo taško kiuvetė: temperatūra = 273,16 K, slėgis = vandens garų slėgis (0,16 kPa)**

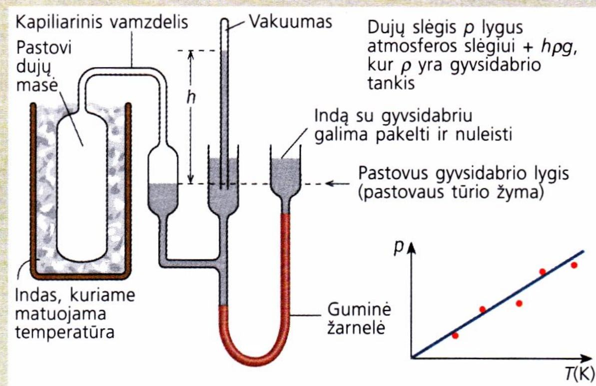
Tam tikros masės idealiosioms dujoms dabar turime:

$$\frac{(pV)_{\text{nežinomoje temperatūroje}}}{\text{nežinoma temperatūra}} = \frac{(pV)_{\text{trigubojo taško temperatūroje}}}{273{,}16}$$

Jei nežinomą temperatūrą pažymėsime T, tai pertvarkę lygtį gausime:

$$T = \frac{(pV)_T}{(pV)_{tr}} \times 273{,}16 \ \text{K},$$

kur indeksas „tr" reiškia trigubą tašką. Taip gauname absoliučiąją temperatūros skalę.



7.28 pav. **Pastovaus tūrio dujinis termometras**

Galėtume tęsti toliau ir įsitikinti, kad ši skalė sutampa su termodinamine skale, kuri apibrėžiama naudojant grįžtamojo ciklo šiluminę mašiną (žr. 15 skyrių). Tačiau termodinaminė skalė yra teorinis įvaizdis, o čia mes turime praktinį metodą temperatūrai matuoti. Dujiniu termometru su nedideliu dujų kiekiu sugraduojame sandaugą pV ir gauname temperatūrą. Kad būtų paprasčiau, dujų tūrį palaikome pastovų, keičiame tik slėgį (žr. 7.28 pav.).

Apibrėžę absoliučiąją skalę, galime matuoti temperatūrą pagal kitas fizikines savybes, pavyzdžiui, gyvsidabrio plėtimąsi kylant temperatūrai, metalų varžos kitimą, arba elektrovarą, kuri atsiranda tarp dviejų skirtingų metalų sandūrų, kai jų temperatūros skiriasi (kaip termoporoje). Prie praktinių temperatūros matavimo aspektų dar grįšime 14 skyriuje.

Avogadro skaičius ir molio masė

Molis yra medžiagos kiekio matavimo vienetas. Bet kokios medžiagos viename molyje yra $6{,}02 \times 10^{23}$ „struktūrinių elementų", kuriais galime laikyti atomus ar molekules. Šis skaičius yra vadinamas Avogadro skaičiumi ir žymimas simboliu N_A. Jis buvo gautas eksperimentiškai nustačius, kiek atomų yra 0,0120 kg (12 g) ^{12}C. Bet kurio kito elemento masė, kurioje yra $6{,}02 \times 10^{23}$ atomų ar molekulių, bus lygi to elemento **molio masei** (simbolis M). Pavyzdžiui, geležies molio masė yra lygi 0,0586 kg, ir joje yra $6{,}02 \times 10^{23}$ atomų.

Tuo tarpu dujinio deguonies molekulę sudaro du atomai, todėl šiuo atveju vieno molio masėje, kuri lygi 0,0320 kg, yra $6{,}02 \times 10^{23}$ molekulių, bet dvigubai daugiau atomų.

Galiausiai išsiaiškinsime proporcingumo koeficientą dujų lygtyje. Eksperimentiškai nustatome, kad šis koeficientas priklauso nuo nagrinėjamų dujų masės. Jei dujų masę padvigubinsime (tai reiškia, kad padvigubės dujų molekulių skaičius), o slėgį ir temperatūrą palaikysime pastovius, tai dujų tūris padvigubės. Taigi pV/T yra proporcingas dujų kiekiui, t. y. proporcingas molių skaičiui n:

$$\frac{pV}{T} = nR \quad \text{arba} \quad pV = nRT,$$

kur R yra proporcingumo konstanta ir yra vadinama **universaliąja dujų konstanta.** Tai fundamentalioji konstanta, kurią galima išmatuoti dideliu tikslumu, ir tai yra dimensinis dydis. Šią konstantą galima rasti pasinaudojus tuo, kad 1 idealiųjų dujų molis normaliomis sąlygomis (273,16 K temperatūra ir $1{,}014 \times 10^5$ Pa slėgis) užima 0,0224 m^3:

$$R = \frac{1{,}014 \times 10^5 \times 0{,}0224}{1 \times 273{,}16} \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8{,}31 \quad \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

(Atkreipkite dėmesį, kad $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \equiv \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} \equiv \text{J}$.)

Ši lygtis $pV = nRT$, užrašyta n dujų molių, arba kitokiu pavidalu – $pV_m = RT$ vienam dujų moliui, kur V_m – molio tūris, yra vadinama **universaliąja dujų būvio lygtimi.**

PAVYZDYS

K Pastovaus tūrio dujinis termometras vandens trigubajame taške rodo 8,00 cm gyvsidabrio stulpelio aukščių skirtumą.

a) Kokį aukščių skirtumą jis rodys:

(i) vandens virimo taške ir

(ii) švino lydymosi taške (327 °C)?

b) Gyvsidabrio tankio reikšmę imkite $1{,}35 \times 10^3$ kg · m^{-3}, ir paverskite rodmenis slėgio matavimo vienetais (kilopaskaliais).

A

a) Tarkime, kad: $\frac{p}{T} = \frac{p_{tr}}{T_{tr}}$,

kur p ir T yra slėgis ir temperatūra termometre, kai jis turi šiluminį sąlytį su medžiaga, o p_{tr} ir T_{pr} – kai turi sąlytį kontakte su vandeniu, esančiu trigubajame taške 373 K. (Neužmirškite temperatūras išreikšti kelvinais.) Kadangi gyvsidabrio stulpelio aukštis yra proporcingas slėgiui, slėgių skirtumą **(i)** ir **(ii)** atvejams galime gauti iš tiesioginio proporcingumo:

(i) p (verdančio vandens) $= \frac{8{,}00 \times 373}{273} = 10{,}9$ cm Hg

(ii) p (tirpstančio švino) $= \frac{8{,}00 \times 600}{273} = 17{,}6$ cm Hg

b) Slėgis, kurį sukuria 1 cm gyvsidabrio stulpelis

stulpelio masė į ploto vienetą $\times g$

= tankis $\times g \times$ aukštis

$$= (1{,}35 \times 10^3) \times 9{,}8 \times (1 \times 10^{-2}) \times 1 = 132 \text{ Pa}$$

$$= 0{,}132 \text{ kPa}$$

(Daugiklis 10^{-2} atsiranda cm verčiant į m). Iš čia:

	Slėgis (cm Hg)	**Slėgis** (kPa)
Vandens trigubasis taškas	8,0	1,06
Vandens virimo taškas	10,9	1,44
Švino lydymosi taškas	17,6	2,32

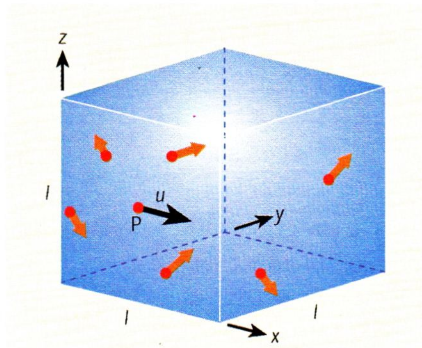
8 KINETINĖ DUJŲ TEORIJA

Dujų elgseną nulemia jų atomų ar molekulių mikroskopinis judėjimas. Šiam judėjimui modeliuoti taikome **kinetinę dujų teoriją.** Gausime idealiųjų dujų slėgio išraišką, o po to išsiaiškinsime, kaip keičiasi dujų molekulių greičiai. Naudosimės modeliu, pagal kurį didelis molekulių skaičius juda uždaroje dėžėje ir nuolat susidūrinėja su jos sienelėmis. Padarysime nemažai prielaidų.

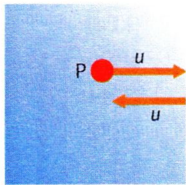
Prielaidos, daromos kinetinėje dujų teorijoje

- Dujas sudaro labai didelis molekulių skaičius N.
- Molekulės juda greitai ir chaotiškai.
- Molekulių judėjimui galioja Niutono mechanika.
- Molekulių susidūrimai tarpusavyje ir su indo sienelėmis yra idealiai tamprūs.
- Tarp molekulių neveikia traukos jėgos.
- Smūgio metu atsirandančios jėgos yra vienintelės tarp molekulių veikiančios jėgos, ir jos yra visiškai momentinės (t. y. veikia trumpą laiką palyginti su laiko tarpsniu tarp gretimų susidūrimų).
- Molekulės užima nykstamai mažą indo, kuriame jos yra, tūrį (molekulės yra taškai erdvėje).

Jei smūgiai būtų netamprūs, kinetinė molekulių energija virstų kitomis energijos formomis, ir dujų slėgis palaipsniui mažėtų. Pavyzdžiui, traukos jėgos tarp molekulių veiktų susidūrimus su sienelėmis, traukdamos molekules nuo sienelių. Kad galėtume laikyti, jog tarp molekulių neveikia traukos jėgos, dujų tankis turi būti mažas.



7.29 pav. **Kubo formos indas su idealiųjų dujų molekulėmis. Molekulė P greičiu *u* juda kryptimi +*x***



7.30 pav. **Judesio kiekio pokytis molekulei P tampriai susiduriant su indo sienele**
judesio kiekio pokytis
= $mu - (-mu) = 2mu$

Idealiųjų dujų slėgis

Imkime kubo formos indą, kurio kraštinės ilgis l, ir pripildykime jį molekulių, kurių masė m (7.29 pav.). Pirmiausia rasime slėgį, kuriuo molekulės veikia dešiniąją sienelę (**1–6** žingsniai), po to – bendrą slėgį, sukeltą visų molekulių (**7–9**).

1 Pirmiausia patyrinėkime molekulę P, greičiu u judančią kryptimi $+x$. Judesio kiekis tuo momentu, kai ji susiduria su dešiniąja sienele, yra mu. Judesio kiekis po *tamprau*s smūgio yra $-mu$. Taigi judesio kiekio pokytis $= mu - (-mu) = 2mu$ (7.30 pav.).

2 Dabar panagrinėkime laiko tarpsnį iki to momento, kol molekulė vėl susidurs su *ta pačia* sienele. Per šį laiką molekulė nukeliaus iki priešingos sienelės, atšoks nuo jos ir sugrįš. Judėdama greičiu u molekulė nueis kelią, lygų $2l$. Todėl laikas tarp dviejų gretimų susidūrimų su ta pačia sienele yra $2l/u$. Vadinasi, molekulė susidurs su dešiniąja sienele po vieną kartą per kiekvieną laiko tarpsnį $2l/u$. Tokių susidūrimų skaičius per laiko vienetą (t. y. per sekundę) lygus $u/2l$ (tai atvirkštinė trukmė tarp susidūrimų).

3 Dabar galime rasti molekulės judesio kiekio *kitimo spartą*: padauginkime judesio kiekio pokytį vieno susidūrimo metu iš susidūrimų skaičiaus per laiko vienetą (t. y. skaičiaus per 1 s). Judesio kiekio kitimo sparta:

$$2mu \times \frac{u}{2l} = \frac{mu^2}{l}$$

4 Pagal antrąjį Niutono dėsnį molekulės judesio kiekio kitimo sparta yra lygi jėgai, kuria sienelė veikia molekulę, kad priverstų ją atšokti. Ši jėga lygi jėgai, kuria molekulė veikia sienelę, tik yra priešingos krypties. Sienelę veikia jėga mu^2/l. Tai, žinoma, vidutinė jėga (žr. 7.22 pav.).

5 Dabar rasime atstojamąją jėgą veikiančią dešiniąją sienelę. Tam susumuosime jėgas, atsirandančias dėl visų N molekulių susidūrimų. Sienelę veikianti atstojamoji jėga:

$$\frac{mu_1^2}{l} + \frac{mu_2^2}{l} + \frac{mu_3^2}{l} + \ldots,$$

kur u_1 – molekulės 1 greitis kryptimi $+x$, u_2 – molekulės 2 greitis ir t. t.

Taigi suminė jėga yra:

$$\frac{m}{l}(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \ldots) = \frac{mN\overline{u^2}}{l},$$

kur
$$\overline{u^2} = \frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \ldots}{N}$$

yra visų greičių kryptimi $+x$ kvadratų vidurkis. (Jis vadinamas kryptimi x judančių molekulių *vidutiniu kvadratiniu greičiu*.)

6 Slėgis, kuriuo šios molekulės veikia sieneles, apibrėžiamas taip:

$$\text{slėgis} = \frac{\text{jėga}}{\text{plotas}} = \frac{mN\overline{u^2}/l}{l^2} = \frac{mN\overline{u^2}}{l \times l^2} = \frac{mN\overline{u^2}}{V},$$

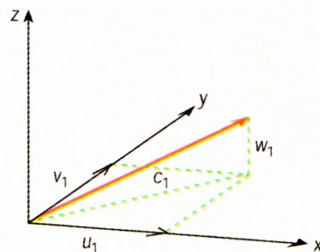
kur V yra indo tūris.

Bendroji dujų masė yra mN, o dujų tankis ρ yra mN/V. Tai leidžia slėgį išreikšti taip: $p = \rho\overline{u^2}$.

7 Judanti molekulė turi ne tik dedamąją x kryptimi, bet ir y bei z kryptimis. Molekulės 1 atstojamąjį greitį c_1 rasime pasinaudoję Pitagoro teorema:

$$c_1^2 = u_1^2 + v_1^2 + w_1^2,$$

kur u_1, kaip ir anksčiau, yra molekulės 1 greičio dedamoji $+x$ kryptimi, o v_1 ir w_1 – molekulės 1 greičio dedamosios kryptimis $+y$ ir $+z$ (7.31 pav.).



7.31 pav. **Greičio c_1 skaidymas į dedamąsias u_1, v_1 ir w_1 ašių x, y ir z kryptimis**

8 Kaip gavome kryptimi x judančių molekulių vidutinį kvadratinį greitį $\overline{u^2}$, taip galime rasti vidutinius kvadratinius greičius dedamosioms kryptimis y ir z:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots}{N} \qquad \overline{w^2} = \frac{w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + \dots}{N}$$

Iš čia gauname atstojamąjį vidutinį kvadratinį greitį:

$$\overline{c^2} = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$$

9 Dabar išvesime galutinę slėgio išraišką. Molekulės vidutiniškai juda vienodai visomis kryptimis. Todėl galime užrašyti:

$$\overline{u^2} = \overline{v^2} = \overline{w^2}$$

Iš čia:

$$\overline{c^2} = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} = 3\overline{u^2}$$

arba:

$$\overline{u^2} = \frac{\overline{c^2}}{3}.$$

Todėl:

$$p = \rho\overline{u^2} = \frac{1}{3}\rho\overline{c^2}$$

Visiškai neatsižvelgėme į susidūrimus tarp molekulių. Tačiau jei tie susidūrimai yra tamprūs, tai ir bendras judesio kiekis, ir suminė kinetinė energija nepakinta. Judesio kiekio ar kinetinės energijos persiskirstymas tarp molekulių neturi įtakos slėgiui.

Žr. 7 ir 8 klausimus.

PAVYZDYS

K Oro tankis 20 °C temperatūroje lygus 1,20 kg · m^{-3}. Atmosferos slėgis lygus 1,01 × 10^5 Pa. Apskaičiuokite oro molekulių vidutinį kvadratinį greitį.

A

$$p = \frac{1}{3}\rho\overline{c^2}$$

Iš kur: $\overline{c^2} = \frac{3p}{\rho} = \frac{3 \times 1{,}01 \times 10^5}{1{,}20} = 2{,}53 \times 10^5 \ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}$

$$\sqrt{\overline{c^2}} = 502 \ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

I Garso sklidimas ore paaiškinamas oro molekulių judėjimu. Literatūroje raskite garso greitį ore ir pakomentuokite jo vertę palyginę su apskaičiuota verte $\sqrt{\overline{c^2}}$.

Galime palyginti slėgio išraišką, gautą remiantis kinetine teorija, su slėgiu, išreikštu iš idealiųjų dujų dėsnio. Pirmoji išraiška remiasi mikroskopiniu molekulių judėjimu, o antroji – makroskopiniais dydžiais tūriu ir temperatūra:

$$p = \frac{1}{3}\frac{Nm}{V}\overline{c^2} \quad \text{ir} \quad p = \frac{n}{V}RT$$



Prisiminkite: $\rho = \frac{Nm}{V}$

Sulyginę šias dvi slėgio išraiškas, gausime:

$$\frac{1}{3}\frac{Nm}{V}\overline{c^2} = \frac{n}{V}RT$$

Iš kur:
$$\frac{1}{3}Nm\overline{c^2} = nRT$$

Ši lygybė nutiesia tiltą tarp mikroskopinio ir makroskopinio modelių.

Žinome, kad $\frac{1}{2}m\overline{c^2}$ yra vienos molekulės kinetinė energija, o $\frac{1}{2}Nm\overline{c^2}$ – visų molekulių suminė kinetinė energija E_K. Pasinaudoję šia siejančiąja lygtimi, įsitikiname, kad molekulių kinetinę energiją galime užrašyti taip:

$$E_K = \frac{3}{2}nRT$$

Taigi visų molekulių kinetinė energija yra tiesiog proporcinga temperatūrai. Ši energija turi būti dujų vidinė energija U. Todėl:

$$U = \frac{3}{2}nRT$$

Prisiminkite, kad ši lygtis aprašo n molių dujų kiekį. 1 molio molekulių kinetinei energijai rasti turime padalyti iš n. Viename dujų molyje yra N_A molekulių, kur N_A – Avogadro skaičius. Padaliję iš N_A gausime vienos molekulės energiją. Po šių dviejų žingsnių turime:

$$U_{\text{vienos molekulės}} = \frac{3}{2}\frac{nRT}{nN_A} = \frac{3}{2}\frac{RT}{N_A}$$

R/N_A yra **Bolcmano konstanta,** k, t. y. dujų konstanta vienai molekulei. Jos vertė lygi $1{,}380 \times 10^{-23}$ J · K^{-1}, ir tai yra labai svarbi fizikoje fundamentalioji konstanta.

Dabar matome, kad vienai molekulei tenkanti kinetinė energija:

$$\mathbf{E_K = \frac{3kT}{2}}$$

ir kad kinetinę energiją $\frac{1}{2}kT$ galime susieti su kiekvienu laisvės laipsniu, t. y. su laisve judėti bet kuria iš krypčių x, y ir z.

Žr. 9 klausimą. ■

Avogadro hipotezė

Jei temperatūra ir slėgis tie patys, tai vienoduose dujų tūriuose yra vienodas molekulių skaičius.

Panagrinėkime dviejų rūšių dujas ir jas pažymėkime indeksais A ir B.

Dujoms A: $p_AV_A = \frac{1}{3}N_Am_A\overline{c_A^2}$

Dujoms B: $p_BV_B = \frac{1}{3}N_Bm_B\overline{c_B^2}$

Jei abiejų dujų slėgiai ir tūriai yra lygūs, šios išraiškos turi būti lygios:

$$N_Am_A\overline{c_A^2} = N_Bm_B\overline{c_B^2} \quad [1]$$

Kadangi jų temperatūros yra lygios:

$$\frac{1}{2}m_A\overline{c_A^2} = \frac{3}{2}kT \text{ arba } \frac{1}{2}m_B\overline{c_B^2} = \frac{3}{2}kT$$

iš kur:
$$\frac{1}{2}m_A\overline{c_A^2} = \frac{1}{2}m_B\overline{c_B^2}$$

Iš lygties [1] matome, kad turi būti:

$$N_A = N_B,$$

o tai ir patvirtina Avogadro hipotezę.

Tai, kas čia buvo aprašyta, galioja idealiosioms dujoms, kurių molekulių dydžio ir tarpusavio sąveikos jėgų galime nepaisyti. Realiose dujose molekulių dydžiai yra baigtiniai, ir tarp jų veikia jėgos, nors ir nedidelės. Tačiau tam tikromis sąlygomis dujos elgiasi panašiai kaip idealiosios dujos.

Esame pabrėžę, kad dujų dėsniai geriausiai tinka esant mažam slėgiui. Svarbu, kad realios dujos neatsidurtų sąlygose, artimose skystėjimui. Taigi temperatūra turi būti gerokai aukštesnė už kritinę temperatūrą, o slėgis turi būti gerokai mažesnis už kritinį slėgį, kuriam esant vyksta skystėjimas. Kinetinės teorijos naudingumą įrodo tai, kad ji patenkinamai aprašo dujas daugelyje praktikoje pasitaikančių atvejų.

9 IDEALIŲJŲ DUJŲ MOLEKULIŲ GREIČIŲ PASISKIRSTYMAS

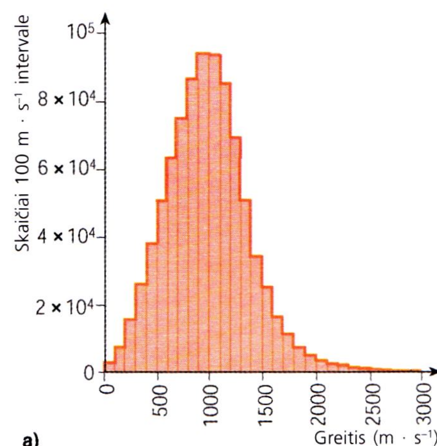
Skaičiuodami idealiųjų dujų slėgį taikėme $\overline{c^2}$, t. y. greičių kvadratų *vidurkį*. Tačiau molekulių greičiai gerokai skiriasi. Situacija panaši į automobilius autostradoje. Kai kurie važiuoja lėtai. Daugelis važiuoja ties leistina greičio riba, kai kurie šiek tiek greičiau, vienas kitas ir labai smarkiai viršydami leistiną greitį. Taip pat ir dujose bus greitų ir lėtų molekulių, o didžiosios dalies greičiai bus artimi vidutiniam greičiui. Šį greitį nulemia dujų temperatūra. Jei autostradoje leistiną greitį pakeisime, keisis ir automobilių greičių pasiskirstymas. Jei pakeisime dujų temperatūrą, keisis ir molekulių greičių pasiskirstymas.

Būdingas dujų molekulių greičių pasiskirstymas parodytas 7.32 pav. 7.32a) pav. šis pasiskirstymas atvaizduotas histograma, o 7.32b) pav. – tolygia kreive. Abiejuose grafikuose x ašyje atvaizduotos galimos molekulių greičių vertės; nuodugniau išsiaiškinsime, kas atvaizduota y ašyje.

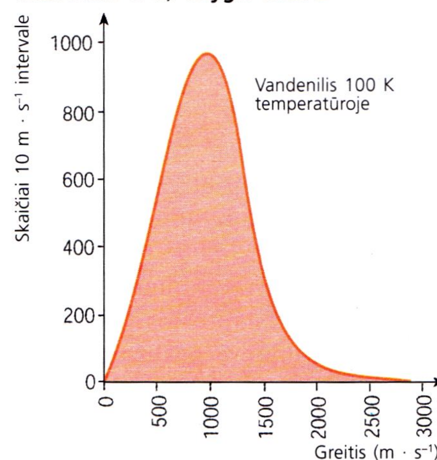
Histogramoje pavaizduotas molekulių, kurios juda tam tikrame greičių intervale, skaičius. Histogramoje paimti 100 m · s^{-1} intervalai, taigi histograma rodo, koks molekulių skaičius juda greičiais nuo 0 iki 99 m · s^{-1}, nuo 100 iki 199 m · s^{-1} ir t. t. Galime nubrėžti kreivę, kuri atvaizduotų histogramos kontūrus, tačiau ji bus nelabai tiksli.

Jei imsime mažesnius intervalus, histogramoje gausime daugiau stulpelių ir galėsime nubrėžti tikslesnę kreivę. Jei imsime 1 m · s^{-1} intervalus, tai gausime pasiskirstymą, kur y ašyje atspindės molekulių skaičių, tenkantį vienetiniam greičio intervalui (t. y. 1 m · s^{-1}), ir gausime tolygią kreivę, kaip 7.32b) pav. Ašies y gradavimas priklauso nuo nagrinėjamų dujų kiekio. Šis kiekis pasirenkamas; 7.32 pav. jis lygus milijonui. Todėl plotas po šiuo grafiku lygus vienam milijonui.

Grafike parodytas *greičio* pasiskirstymas. Tačiau skaičiuojant slėgį imamas *greičio kvadratas*, todėl didžiausią įtaką turi molekulės, kurios pasiskirstyme yra didesnių greičių srityje (dešinėje pusėje). Analogiškai autostradoje avarijų pasekmės dažniausiai priklauso nuo automobilių kinetinės energijos, taip pat jų masės. Kinetinė energija proporcinga greičio kvadratui, todėl didėjant greičiui, avarijų padariniai darosi vis sunkesni. Tai – svarbi priežastis greičiui riboti.



7.32 pav. Būdingas 1 milijono vandenilio molekulių greičių pasiskirstymas 100 K temperatūroje, pavaizduotas a) **histograma, suskirstyta 100 m · s^{-1} intervalais ir** b) **tolygia kreive**



?

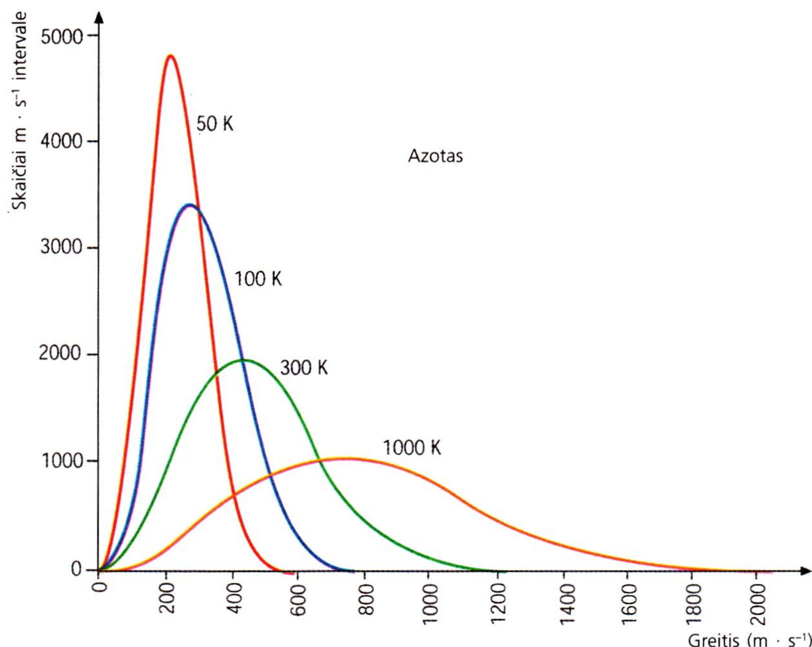
J Naudodamiesi 7.32b) paveikslu:

a) Raskite dujų molekulių tikimiausią greitį.

b) Įvertinkite, kokios molekulių dalies greičiai telpa intervale nuo 500 m · s^{-1} iki 1000 m · s^{-1}.

c) Įvertinkite, kokia molekulių dalis juda greičiais, kurie daugiau kaip du kartus viršija tikimiausią greitį.

7.33 pav. **Milijono azoto molekulių greičių pasiskirstymo kitimas, kintant šių dujų temperatūrai**



Jei dujos kaitinamos, tai greičių pasiskirstymą vaizduojanti kreivė išplinta horizontalia kryptimi (7.33 pav.), tačiau plotas po kreive išlieka tas pats. Bendras plotas po kreive turi išlikti pastovus, kadangi jis atitinka bendrą molekulių skaičių. Kadangi kreivė išplinta horizontaliai, tai akivaizdu, jog molekulių, kurios juda greičiais, artimais kreivės smailei, skaičius didėjant temperatūrai turi mažėti.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių jūs turėtumėte sugebėti:

- Kokybiškai apibūdinti medžiagos būsenų skirtumus.
- Apibūdinti tarpatominių ryšių rūšis.
- Paaiškinti slaptosios šilumos sąvoką ir gebėti skaičiavimuose pasinaudoti slaptosios šilumos vertėmis.
- Nubraižyti ir paaiškinti jėgos ir potencinės energijos priklausomybes nuo atstumo tarp gretimų atomų kietuosiuose kūnuose ar skysčiuose.
- Aprašyti paprastąją kubinę kristalo struktūrą naudojantis atomų rutuliukų dėliojimo įvaizdžiu ir atlikti paprastus atstumo tarp atomų skaičiavimus.
- Apibūdinti Brauno judėjimą.
- Suformuluoti dujų dėsnius

$$pV = \text{const} \qquad \frac{p}{T} = \text{const} \qquad \frac{V}{T} = \text{const}$$

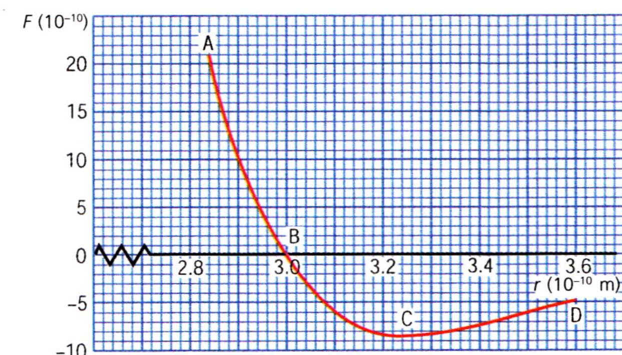
ir paaiškinti, kaip juos pagrįsti eksperimentiškai.
- Suvokti sąryšį tarp Kelvino temperatūros skalės ir idealiųjų dujų lygties bei paaiškinti, kaip pastovaus tūrio dujinį termometrą galima panaudoti Kelvino temperatūros matavimui.
- Naudotis idealiųjų dujų lygtimi

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{arba} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

dujų slėgio, tūrio ir temperatūros skaičiavimuose.
- Suprasti, kad idealiųjų dujų būseną aprašo lygtis $pV = nRT$, kur R – universalioji dujų konstanta.
- Išvardyti pagrindines idealiųjų dujų kinetinės teorijos prielaidas ir atlikti paprastus skaičiavimus naudojantis šia teorija.
- Suvokti sąryšį tarp Avogadro skaičiaus N_A ir molio.
- Žinoti, kad vienai molekulei tenkanti vidutinė kinetinė energija yra $3kT/2$, kur k yra Bolcmano konstanta, lygi R/N_A.

KLAUSIMAI

1 7.K1 pav. pavaizduota, kaip jėga *F*, veikianti tarp dviejų molekulių, priklauso nuo atstumo tarp jų *r*.



7.K1 pav.

a) Apibūdinkite, kaip *F* priklauso nuo *r* ruožuose nuo A iki B, nuo B iki C ir nuo C iki D. Paaiškinkite, kaip iš tokias savybes turinčių molekulių sudarytas strypas elgsis veikiamas nedidelės išilginės jėgos.

b) Naudodamiesi grafike pateikta informacija, raskite pusiausvirąjį atstumą tarp molekulių ir santykinę deformaciją, kurią viršijus ryšys tarp molekulių nutrūktų.

c) Naudodamiesi grafiku įvertinkite energiją, kurios reikėtų atstumui tarp molekulių sumažinti nuo $3{,}0 \times 10^{-10}$ iki $2{,}9 \times 10^{-10}$ m.

2

a) Grafiškai atvaizduokite, kaip nuo atstumo tarp dviejų atomų priklauso **(i)** jų potencinė energija ir **(ii)** tarpusavio sąveikos jėga. Paaiškinkite šių kreivių formas. Abiejuose grafikuose pažymėkite pusiausvyros padėtis.

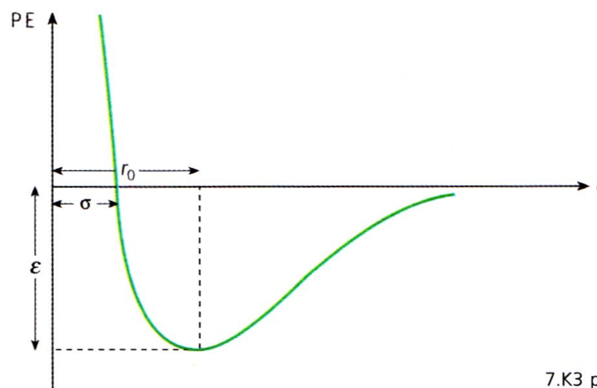
b) Šį modelį galima pritaikyti kietos būsenos metalui.

(i) Paaiškinkite, kaip keturi fizikiniai dydžiai – molio tūris, molinė slaptoji lydymosi šiluma ir linijinio plėtimosi bei spūdumo koeficientai – priklauso nuo potencinės energijos ir jėgos priklausomybių nuo atstumo formų.

(ii) Molinis aliuminio tūris lygus $1{,}0 \times 10^{-5}$ m^3 · mol^{-1}. Įvertinkite vidutinį atstumą tarp atomų aliuminyje. Aliuminio molinė slaptoji lydymosi šiluma yra 11 kJ · mol^{-1}. Laikydami, kad lydantis šiam metalui nutrūksta 1 iš 12 ryšių tarp aliuminio atomo ir jo kaimynų, įvertinkite potencinės energijos minimumo gylį.

3

a) 7.K3 pav. pavaizduotas molekulių poros potencinės energijos pokytis keičiantis atstumui tarp jų *r*. Kokią prasmę turi ε, σ ir r_0?



7.K3 pav.

b) **(i)** Vandens molinė slaptoji garavimo šiluma lygi $4{,}07 \times 10^4$ J · mol^{-1}. Įvertinkite ε, kai artimiausių kaimyninių atomų skaičius vandenyje lygus 10. Įrodykite visas naudojamas formules.

(ii) Vandeniui verdant normaliame atmosferos slėgyje ($1{,}0 \times 10^5$ Pa) vieno jo molio tūris padidėja nuo $1{,}90 \times 10^{-5}$ m^3, kurį jis užima būdamas skysčiu 100 °C temperatūroje, iki $30{,}4 \times 10^{-3}$ m^3, kai virsta 100 °C temperatūros garais. Apskaičiuokite energiją, kurios reikia, kad būtų įveiktas atmosferos pasipriešinimas, kol 100 °C temperatūroje išvirinamas (išgarinamas) 1 molis vandens.

(iii) Atsižvelgdami į savo atsakymą į klausimą **b)(ii)**, peržiūrėkite ε įvertinimą, kurį atlikote atsakydami į klausimą **b)(i)**. Pakomentuokite savo samprotavimus.

c) Įvertinkite vandens paviršiaus ploto vienetui tenkančių molekulių skaičių, kai vandens paviršiaus energijos tankis 100 °C temperatūroje lygus 0,058 J · m^{-2}.

d) Tarę, kad vandens molekulės supakuotos į elementarią kubinę struktūrą, įvertinkite r_0.

4 Varinio bandinio mechaninės savybės dažniausiai labai skiriasi nuo verčių, teoriškai apskaičiuotų naudojantis idealaus centruoto paviršiaus kubinio monokristalo modeliu, pagal kurį atomai sudaro kubinę tankios sanglaudos struktūrą.

a) Pavaizduokite atomų išsidėstymą tokiame idealiame vario kristale.

b) Koks bus realaus vario bandinio atsparumas tempimui palyginus su tuo, kurį galima prognozuoti idealiam vario monokristalui? Skirtumus paaiškinkite mikrostruktūros požiūriu.

(Pasinaudokite 5 skyriaus medžiaga.)

5 Lygybė p/T = const aprašo idealiąsias dujas. Paaiškinkite simbolių *p* ir *T* prasmę. Kokiomis sąlygomis galioja ši lygybė?

Aprašykite eksperimentą, kuriuo patikrintumėte, ar ši lygtis galioja tokioms dujoms kaip oras, jei patenkintos jūsų išvardytos sąlygos.

6 Automobilio padangos pripūstos iki 26 lb · in^{-2} virš atmosferos slėgio [1 svaras (lb) atitinka 4,45 N, o 1 colis (in) lygus 2,54 cm (*Vert. past.*)]. Oro padangose temperatūra yra 18 °C. Koks bus slėgis padangose po

kelionės, kai padangose esančio oro temperatūra pakils iki 25 °C? Tarkime, padangų tūris nepakinta.

7

a) **(i)** Išvardykite keturias kinetinės dujų teorijos prielaidas.

(ii) Dujų molekulė kubo formos inde greičiu c juda statmenai vienai iš indo sienelių. Įrodykite, kad vidutinė jėga, kuria molekulė veikia sienelę, yra proporcinga c^2.

b) Lentelėje pateiktos tam tikros dujų masės slėgio ir tankio vertės, išmatuotos esant pastoviai 27 °C temperatūrai.

Slėgis (10^5 Pa)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Tankis (kg · m^{-3})	0,68	0,91	1,14	1,37	1,60

(i) Grafiškai pavaizduokite slėgio sąryšį su tankiu. Ar jūsų grafikas rodo, kad šiomis sąlygomis dujos elgiasi kaip idealios? Pagrįskite savo atsakymą.

(ii) Naudodamiesi savo grafiku apskaičiuokite dujų molekulių vidutinį kvadratinį greitį.

(iii) Dujų temperatūra pakeliama iki 57 °C. Apskaičiuokite slėgį, kai tankis lygus 1,00 kg · m^{-3}, ir tame pačiame grafike nubrėžkite analogišką slėgio sąryšio su tankiu priklausomybę esant 57 °C temperatūrai.

c) Inde uždarytas helio ir argono mišinys; jų santykinės masės yra atitinkamai 4 ir 40.

(i) Inde esančioms dujoms apskaičiuokite santykį:

$$\frac{\text{helio atomų vidutinis kvadratinis greitis}}{\text{argono atomų vidutinis kvadratinis greitis}}$$

(ii) Inde yra maždaug vienodas helio ir argono atomų skaičius; dujos pradeda lėtai nutekėti pro mažą skylutę inde. Ar po kurio laiko inde likusių argono atomų skaičius bus didesnis, ar mažesnis nei helio atomų skaičius? Pagrįskite savo atsakymą.

8 Aukšto slėgio rezervuare yra 3,00 molio argono dujų, kurių temperatūra lygi 23,0 °C (santykinė argono masė = 40,0).
Apskaičiuokite: **a)** argono atomų vidutinį kvadratinį greitį ir **b)** šių dujų kinetinę energiją.

9

a) **(i)** Paaiškinkite, kodėl molekulių judėjimas sukelia slėgį į indo sieneles.

(ii) Naudodamiesi paprastu modeliu išveskite sąryšį $p = \frac{1}{3}\rho\overline{c^2}$, aprašantį idealiųjų dujų sukeliamą slėgį.

b) Naudodamiesi idealiųjų dujų dėsniu įrodykite, kad $\overline{c^2} = 3RT/M$, ir apskaičiuokite 20 °C temperatūroje esančių deguonies molekulių vidutinį kvadratinį greitį. (Deguonies santykinė molekulinė masė = 32.)

c) Tam tikruose mikroelektroninių prietaisų gamybos procesuose, kur reikia švarių paviršių, reikia sukurti tokias sąlygas, kad su gaminiu susiduriančių molekulių skaičius, per sekundę tenkantis ploto vienetui, N, būtų mažesnis už kritinę vertę. Naudodamiesi paprastu modeliu kaip ir klausimo dalyje **a)**, įrodykite, kad $N = nc_x/2$, kur c_x – vidutinis molekulių greitis x kryptimi, o n – molekulių skaičius tūrio vienete.

d) Tarę, kad c_x yra apytiksliai lygus vertei, gautai atsakant į klausimo dalį **b)**, įvertinkite, koks turi būti slėgis, kad N neviršytų 1×10^{13} susidūrimų m^{-2} · s^{-1}. Pasinaudokite tuo, kad $n = N_A p/RT$.

e) Įvertinkite laiką, per kurį paviršius praktiškai visiškai pasidengs deguonimi. (Atstumas tarp atomų kieto kūno paviršiuje yra 3×10^{-9} m eilės.)

Užduotis

MAKSVELO IR BOLCMANO GREIČIŲ PASISKIRSTYMAS IR MOLEKULIŲ PLUOŠTELIAI

Dabar dinaminę duomenų lentelę panaudosime tam, kad grafiškai pademonstruotume molekulių greičių pasiskirstymą, kai indas pripildomas skirtingų dujų, ir kai jų temperatūra yra skirtinga. Tokį greičių pasiskirstymą tiesiogiai išmatuoti nėra lengva, tačiau įmanoma išmatuoti greičių pasiskirstymą tų molekulių, kurios išlekia iš indo pro mažą skylutę.

Maksvelo ir Bolcmano greičių pasiskirstymas

Nagrinėsime *N* vienodų molekulių, esančių uždarame inde. Galima įrodyti, kad molekulių, kurių greitis intervale nuo *v* iki *v* + d*v*, skaičius d*N* yra lygus:

$$dN = N\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{M}{k}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{1}{T^{3/2}}v^2\exp\left(-\frac{Mv^2}{2kT}\right)dv \qquad [1]$$

kur *N* – bendras inde esančių molekulių skaičius,
M – vienos molekulės masė
k – Bolcmano konstanta
T – absoliutinė temperatūra.

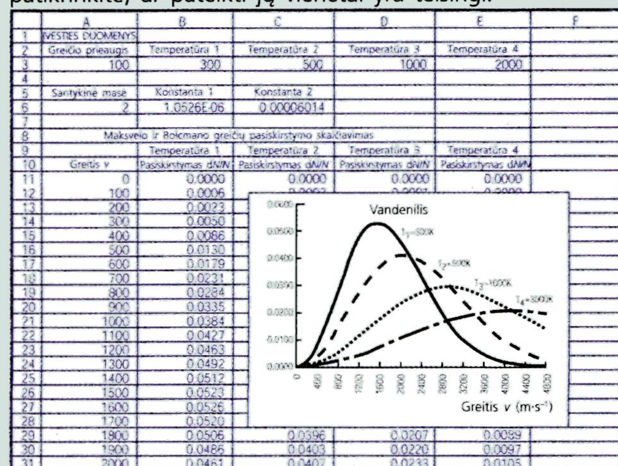
Vietoj *M* galime užrašyti *mu*, kur *m* yra santykinė atomo ar molekulės masė, *u* – atominis masės vienetas. Lygtį perrašome šitaip:

$$\frac{dN}{N} = \text{const}1\times\left(\frac{m}{T}\right)^{\frac{3}{2}}v^2\exp\left(-\frac{\text{const}2\times mv^2}{T}\right)dv \qquad [2]$$

kur
$$\text{const}1 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{u}{k}\right)^{\frac{3}{2}} = 1{,}053\times10^{-6}\ \ \text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{2}\cdot\text{K}^{\frac{3}{2}}$$

o
$$\text{const}\,2 = \frac{u}{2k} = 6{,}014\ \ \text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{2}\cdot\text{K}$$

1 Nustatę *u* ir *k* matavimo vienetus ir naudodamiesi koeficientus const 1 ir const 2 aprašančiomis formulėmis patikrinkite, ar pateikti jų vienetai yra teisingi.



	A	B	C	D	E	F
1	ĮVESTIES DUOMENYS					
2	Greičio prieaugis	Temperatūra 1	Temperatūra 2	Temperatūra 3	Temperatūra 4	
3	100	300	500	1000	2000	
4						
5	Santykinė masė	Konstanta 1	Konstanta 2			
6	2	1.0526E-06	0.00006014			
7						
8	Maksvelo ir Bolcmano greičių pasiskirstymo skaičiavimas					
9		Temperatūra 1	Temperatūra 2	Temperatūra 3	Temperatūra 4	
10	Greitis v	Pasiskirstymas dN/N	Pasiskirstymas dN/N	Pasiskirstymas dN/N	Pasiskirstymas dN/N	
11	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
12	100	0.0006	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
13	200	0.0023				
14	300	0.0050				
15	400	0.0086				
16	500	0.0130				
17	600	0.0179				
18	700	0.0231				
19	800	0.0284				
20	900	0.0335				
21	1000	0.0384				
22	1100	0.0427				
23	1200	0.0463				
24	1300	0.0492				
25	1400	0.0512				
26	1500	0.0523				
27	1600	0.0526				
28	1700	0.0520				
29	1800	0.0506	0.0396	0.0207	0.0089	
30	1900	0.0486	0.0403	0.0220	0.0097	
31	2000	0.0461	0.0407	0.0233	0.0105	

7.U1 pav. **Maksvelo ir Bolcmano greičių pasiskirstymo dinaminė duomenų lentelė ir grafikas**

2 Užpildykite dinaminę duomenų lentelę kaip parodyta 7.U1 pav., ir palyginkite pasiskirstymus esant keturioms skirtingoms temperatūroms. Įrašykite į langelius šiuos dydžius (duomenų lentelėje kintamieji nežymimi kursyvu):

A1: Pavadinimas – Įvesties duomenys
A2: Užrašas – greičio prieaugis
nuo B2 iki E2: Pavadinimai – temperatūros nuo 1 iki 4
A3: Reikiamas greičio prieaugis (pvz., 100)
nuo B3 iki E3: Atitinkamos temperatūros
nuo A5 iki C5: Užrašas – santykinė masė, const 1, const 2
A6: Santykinės masės vertė (pvz., 2 vandeniliui H_2)
nuo B6 iki C6: Dviejų konstantų vertės
A8: Pavadinimas – Maksvelo ir Bolcmano greičių pasiskirstymo skaičiavimas (dinaminėje lentelėje pavadinimas gali kiek reikia tęstis išilgai eilutės)
nuo B9 iki E9: Pavadinimai – Temperatūros nuo 1 iki 4
A10: Stulpelio pavadinimas – Greitis *v*
nuo B10 iki E10: Stulpelių pavadinimai – Pasiskirstymas d*N*/*N*

3

Dabar įveskite **duomenis** ir **formules.**

A11: Greitis 0
A12: = A11 + $A$3 (taip greitis padidinamas vienu žingsniu)

Dabar pasižymėkite ir paryškinkite langelį A12 ir dar tiek langelių, kiek reikia visam greičių ruožui, pavyzdžiui, paryškinkite iki A58. Pasirinkčių skiltyje „Redagavimas" pasirinkite veiksmą „Užpildyti žemyn". Į langelį B11 įterpkite formulę:

$B$6*($A$6/$B$3)^1,5*A11^2*
EXP(-$C$6*$A$6*A11^2/$B$3)*$A$3

a) Palyginkite šią išraišką su anksčiau pateikta lygtimi [2] ir įsitikinkite, kad pagal ją skaičiuojamos molekulių, turinčių greitį intervale d*v*, santykinio skaičiaus vertės.

Paryškinkite langelį B11 ir naudodami komandą „Užpildyti žemyn" užpildykite langelius žemyn iki B58. Tą patį atlikite C, D ir E stulpeliuose.

Nukopijuokite formulę iš langelio B11 į langelius C11, D11 ir E11 ir dviejose tos formulės vietose pakeiskite $B$3.

b) Kuo pakeisite $B$3?

Užpildykite žemyn kaip ir anksčiau.

Dabar patikrinkite savo lentelę. Kiekviename langelyje įrašytas santykinis skaičius molekulių, kurių greičiai patenka į atitinkamą intervalą. Taigi kiekvieno stulpelio verčių suma lygi vienetui, jei pasirinkta pakankamai daug langelių, kad būtų įskaitytos beveik visos molekulės.

c) Paaiškinkite, kodėl sakome „beveik visos", o ne „visos" molekulės.

Stulpelį B (1-oji temperatūra) susumuosite surinkę = SUM(B11:B58), o stulpelius C, D, ir E surinkę komandą „Užpildyti dešinėn".

d) Pakomentuokite gautus rezultatus.

4

a) Naudodamiesi grafinio atvaizdavimo komandomis nubraižykite greičio pasiskirstymo grafikus. Apibūdinkite, kaip greičio pasiskirstymas kinta kintant temperatūrai. Surašykite į lentelę greičių vertes, kurioms esant molekulių skaičius pasiekia maksimumą, kai temperatūros skirtingos.

b) Molekulių vidutinis (vidutinis kvadratinis) greitis gaunamas iš $\frac{1}{2}Mv^2 = \frac{3}{2}kT$. Papildykite savo lentelę šiomis vertėmis ir paaiškinkite, kodėl jos skiriasi nuo gautų atsakant į klausimą **4a)**.

c) Naudodamiesi dinamine duomenų lentele palyginkite vandenilio, H_2, ir kitų molekulių greičių pasiskirstymą (žr. 7.U1 lentelę). Atkreipkite dėmesį, kad jums gali tekti pakeisti ne tik santykinę masę *m*, bet ir greičio prieaugį. Apibūdinkite, kaip pakinta pasiskirstymas.

Molekulė	Santykinė masė
Helis, He	4
Argonas, Ar	18
Deguonis, O_2	32
Chloras, Cl_2	70

7.U1 lentelė. **Santykinės dujų molekulių masės**

Efuzija ir molekuliniai pluošteliai

Norint eksperimentiškai patvirtinti, kad inde esančių molekulių greičiai pasiskirsto pagal Maksvelo ir Bolcmano dėsnį, molekulėms leidžiama išlėkti iš indo pro mažą skylutę. Šis procesas vadinamas **efuzija.** Išlekiančių molekulių greičiai matuojami, tačiau išlėkusių molekulių greičių pasiskirstymas yra kitoks nei tų, kurios buvo inde. Pasiskirstymo išraišką dar reikia padauginti iš *v*.

5

a) Kodėl iš indo išlekia didesnė dalis greitų molekulių nei lėtų? (Pagalvokite, kiek laiko molekulė turi inde judėti pirmyn ir atgal, kol pataikys į tą mažą skylutę.)

b) Sudarykite dinaminę duomenų lentelę efuzijai. Pirmiausia langelyje A8 pakeiskite pavadinimą. Greičių pluoštelyje pasiskirstymo formulė dabar bus tokia:

$$\frac{dN}{N} = \text{const1} \times \left(\frac{m}{T}\right)^2 v^3 \exp\left(-\frac{\text{const2} \times mv^2}{T}\right) dv \qquad [3],$$

kur $\text{const1} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{u}{k}\right)^2 = 7{,}235 \times 10^{-7} \ \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{K}^2$,

o const 2 išlieka tokia pati. Jums gali kilti klausimas, kodėl pakito const 1, o tuo pačiu ir priklausomybė nuo *m* ir *T*. Taip atsitinka dėl to, kad plotą po kreivėmis mes vėl normuojame į vienetą. Išraiška langeliui B11 dabar yra tokia:

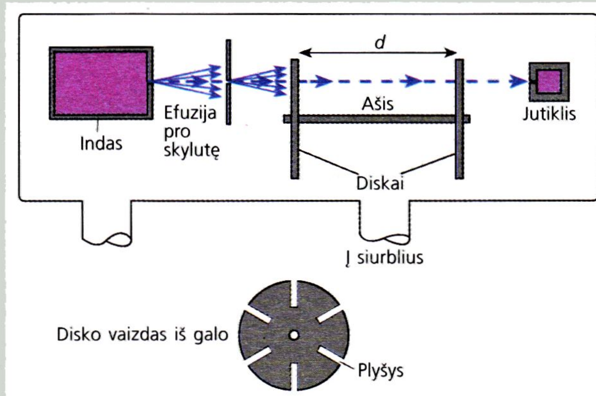
```
=$B$6*($A$6/$B$3)^2*A11^3*
EXP(-$C$6*$A$6*A11^2/$B$3)*$A$3
```

Įsitikinkite, kad ši išraiška sutampa su lygtimi [3]. Atitinkamai pakeiskite langelius C11, D11 ir E11. Patikrinkite, ar verčių langeliuose nuo B11 iki B58 ir t. t. sumos maždaug lygios vienetui. Jei ne, tai neįskaitėte visų molekulių, todėl reikia padidinti greičio prieaugį.

c) Pavaizduokite pasiskirstymą grafiškai ir palyginkite su Maksvelo ir Bolcmano pasiskirstymu. Įdomu būtų tai pakartoti su kitomis molekulėmis. Ar kreivių smailių koordinatės pasikeitė?

Eksperimentinis pasiskirstymo tikrinimas

Tai galima atlikti panaudojant greičių išskyriklį, pavaizduotą 7.U2 pav. Kai abu išskyriklio diskai, esantys ant nejudamos ašies, yra tiksliai vienas prieš kitą, molekulės pralekia tiesiai per plyšius ir patenka į jutiklį. Kai diskai sukami, molekulės patenka į jutiklį tik tada, kai jų praskriejimo tarp diskų trukmė yra lygi laikui, per kurį sekantis plyšys atsisuka į tą pačią padėtį.



7.U2 pav. **Greičių išskyriklis molekulių pluošteliui gauti**

6

a) Tarkime, kad atstumas tarp diskų lygus *d*, sukimosi dažnis *f*, o diskuose yra po šešis plyšius; išveskite formulę skaičiuoti greičiui *v* tų molekulių, kurios išlekia pro gretimą plyšį antrajame diske.

b) Jei atstumas tarp diskų 10 cm, o tam tikrų dujų molekulės išlekia iš indo esant 300 K temperatūrai, apskaičiuokite, kokiu dažniu *f* turi suktis diskas, kad jutiklyje stebėtume maksimalų signalą.

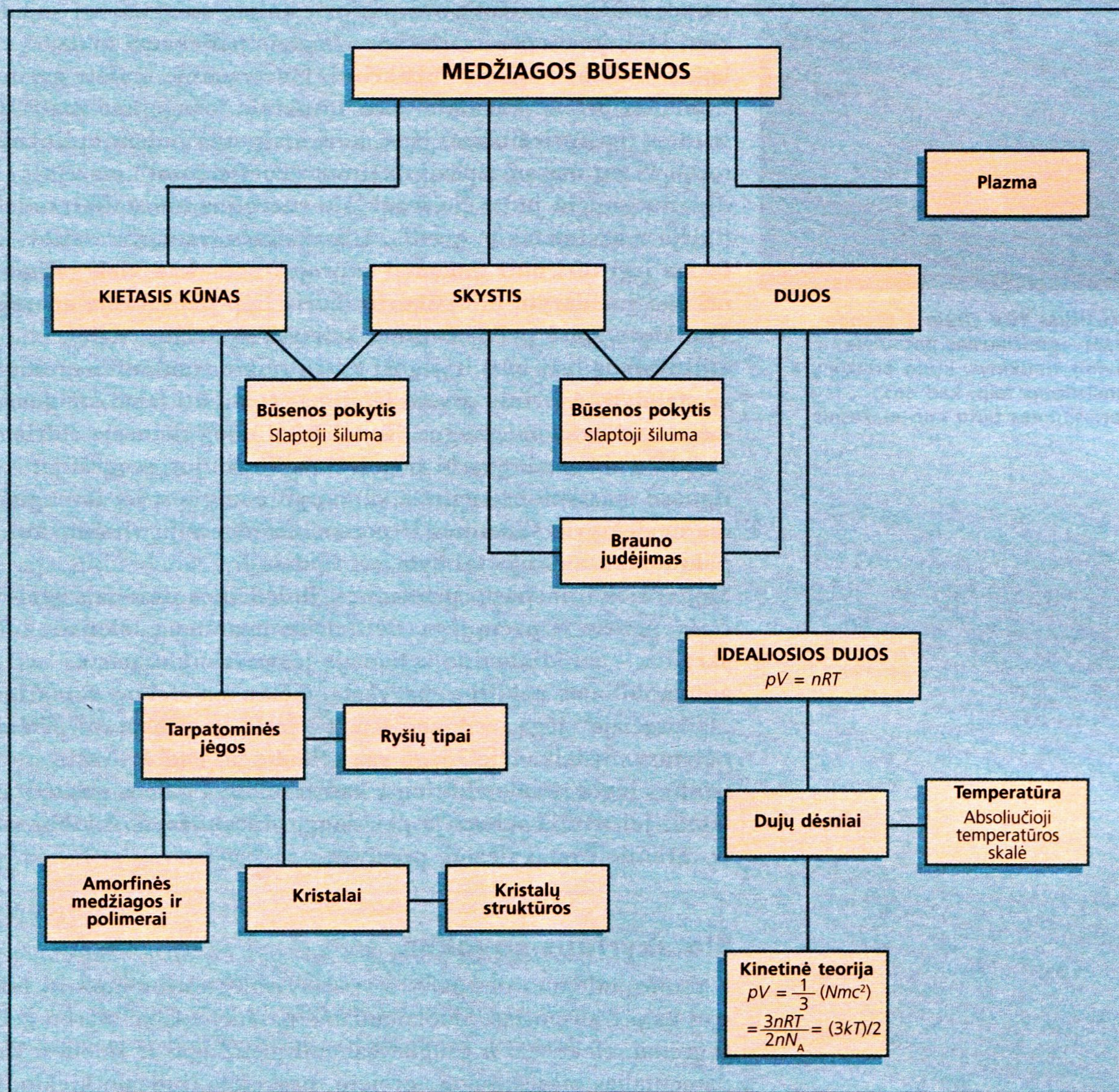
Kadangi greičių pasiskirstymas priklauso nuo molekulių masių, efuziją pro mažas skylutes membranoje galima panaudoti izotopams atskirti. Būtent tokiu būdu, panaudojant dujas UF_6, iš pradžių buvo atskyrinėjami urano izotopai branduoliniams įrenginiams.

c) Paaiškinkite, kodėl tam buvo naudojama labai daug membranų ir atskyrimo pakopų.

Efuzinės kameros yra plačiai naudojamos formuojant plonus molekulių pluoštelius kristalinių sluoksnių auginimui molekulinio pluoštelio epitaksijos (MBE, *Molecular Beam Epitaxy*) būdu. Epitaksija – tai toks metodas, kai sluoksnis auginamas ant kristalo paviršiaus.

MEDŽIAGOS

Į žemiau pateiktą šio skyriaus schemą įtrauktos svarbiausios sąvokos, susijusios su medžiagų rūšimis ir elgesiu kietoje, skystoje ir dujinėje būsenose. Pagal šią schemą galite patikrinti, kokias sąvokas, numatytas jūsų mokymosi programoje, jau gerai žinote ir kokias temas jums reikėtų dar panagrinėti.



8 Transportas



Prancūziškas TGV (*Train à Grande Vitesse*) – greičiausias pasaulyje keleivinis traukinys, kurio priekis yra sukonstruotas taip, kad oro pasipriešinimas būtų kuo mažesnis

Konstruojant greituosius traukinius išlaidos degalams sumažinamos mažinant trintį: oro pasipriešinimą stengiamasi sumažinti kiek įmanoma, o trintis su bėgiais paliekama tokia, kokios reikia saugumui užtikrinti. Nuotraukoje matote greitojo traukinio priekį. Parinkta tokia traukinio forma, kad mažintų trinties (pasipriešinimo) jėgą, kuri atsiranda judant aplinkoje (ore). Esant mažam „pasipriešinimo koeficientui" mažėja dideliu greičiu judančio traukinio energijos nuostoliai, todėl didėja maksimalus jo greitis. Užpakalinės traukinio dalies forma irgi turi būti tinkamai suprojektuota, kad kiek galima mažiau susidarytų oro sūkurių, kurie taip pat eikvoja energiją. Traukinio masė priklauso nuo keleivių skaičiaus, todėl atitinkamos turi būti ir jėgos, kurių reikia traukiniui greitinti ar stabdyti. Avariniu atveju lėtėjimas turi būti labai staigus, tačiau pakankamai saugus. Todėl labai daug dėmesio skiriama stabdžių sistemai. Svarbi ir geležinkelio linijos geografija: ilguose maršrutuose galima sutaupyti energijos, jei išvengiama neefektyvių kinetinės ir potencinės energijų virsmų, kai pakrautas traukinys tai kyla, tai leidžiasi.

Modernios transporto priemonės, judėdamos dideliais greičiais, patiria tą pačią jėgą, dėl kurios įmanomas lėktuvo skrydis, – aerodinaminę keliamąją jėgą. Traukiniams ar automobiliams pakilti nepavyksta, tačiau šis efektas sumažina „laikančiąją" jėgą, veikiančią tarp žemės ir transporto priemonės ratų. Ši laikančioji jėga yra reikalinga, kad atsirastų trinties jėgos, kurios būtinos, kad traukinys galėtų greitėti ar lėtėti. Jei trintis sumažėja per daug, prarandamas sukibimas, ir varantieji ratai tiesiog praslysta.

Šio skyriaus sąvokos

Niutono judėjimo dėsniai yra ypač svarbūs norint suprasti tokią sritį kaip transportas. Šiuolaikiniame pasaulyje labai svarbu gebėti greitai, efektyviai ir saugiai gabenti medžiagas ir žmones. Fundamentalias **masės, jėgos, greičio, pagreičio, judesio kiekio, jėgos impulso** ir **energijos** sąvokas čia taikysime ne tik transporto priemonių judėjimui. Taip pat nagrinėsime terpių (skysčių ir dujų) elgesį, kad išsiaiškintume, kodėl neskęsta laivai, skrenda lėktuvai ir kaip skysčiai bei dujos tiekiami vamzdynais. Transporto sistemose svarbu atsižvelgti į tai, kad transporto priemonės juda terpėje (dažniausiai ore), ir kad terpė yra svarbus judėjimą ribojantis veiksnys.

Tačiau judanti terpė perduoda kinetinę energiją, todėl ją galima panaudoti darbui atlikti. Judantis vanduo suka turbinas hidroelektrinėse, judančio oro energija išnaudojama vėjo jėgainėse, kurios yra pigus energijos šaltinis, tiesa, turintis ir neigiamą poveikį aplinkai.

1 JUDESIO KIEKIO IR ENERGIJOS TVERMĖ TRANSPORTO SISTEMOSE

Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose buvo aptartos svarbiausios judesio kiekio ir energijos sąvokos nagrinėjant judančius kūnus. Tiek bendroji energija, tiek ir judesio kiekis **išsilaiko,** kai varikliai yra naudojami tam, kad judėtų tokios transporto priemonės kaip automobiliai, traukiniai ar raketos, tačiau neišsilaiko *kinetinė* energija.

Pagalvokite apie raketą: išmetamos dujos ir pati raketa kinetinę energiją įgyja iš degančio kuro, tačiau nemaža kuro mišinyje esančios energijos dalis perduodama chaotiniam dujų dalelių judėjimui ir nepanaudojama kaip naudinga kinetinė energija pačiame raketiniame variklyje. Tas pat galioja ir kelių bei geležinkelių transporto priemonėms, kurios įgyja energiją iš degančio kuro. Net elektromobilių varikliai priklauso nuo kuro, suvartoto elektros gamybai elektrinėse.

Ne visa energija, kurią perduoda transporto sistema, pasireiškia kinetinės energijos pavidalu. Dalis energijos dažnai virsta gravitacine potencine energija ir vėl kinetine energija, pavyzdžiui, kylant ir leidžiantis lėktuvui arba transporto priemonėms važiuojant raižyta vietove. Tačiau pakilus tenka nusileisti, todėl grįžtančios į pradinį lygį transporto priemonės suminis gravitacinės potencinės energijos pokytis lygus nuliui. Paprastai visada patiriami nuostoliai dėl trinties. Pavyzdžiui, stabdant transporto priemonę energija atiduodama aplinkai (kaista stabdžių diskai).

Vis dėlto vykstant visiems šiems pokyčiams ir *suminė* energija, ir judesio kiekis išsilaiko, nors sekti energijos pokyčius yra daug sunkiau nei judesio kiekio.

Žr. 1 klausimą.

Varomoji jėga ir stabdymas

Automobilio valdymas – greitėjimas, posūkių darymas ir stabdymas – priklauso nuo jo sąlyčio su kelio paviršiumi. Pagrindinis veiksnys – **trintis** tarp padangų ir kelio paviršiaus. Sąlyčio plotas, kaip parodyta pavyzdyje, yra nedidelis.

PAVYZDYS

K Automobilio masė yra 1000 kg. Slėgis jo padangose yra $2{,}4 \times 10^5$ Pa virš normalaus atmosferinio slėgio, t. y. maždaug lygus $3{,}4 \times 10^5$ Pa. Koks yra padangos sąlyčio su keliu plotas?

A Pasinaudoję apibrėžimu slėgis = jėga/plotas, gauname:

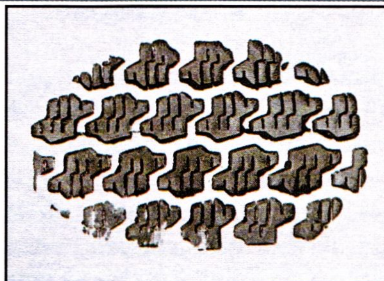
$$\text{sąlyčio plotas} = \frac{\text{automobilio svoris}}{\text{padangos slėgis}} = \frac{1000 \times 9{,}8}{3{,}4 \times 10^5} = 0{,}029 \text{ m}^2$$

Iš čia gauname, kad bendras plotas yra 290 cm². Taigi *vienai padangai* tenka 72 cm² plotas – maždaug lygus jūsų rankos plaštakos plotui.

A Įvertinkite slėgį, kuriuo veikiate grindis, kai basas remiatės abiem kojomis.



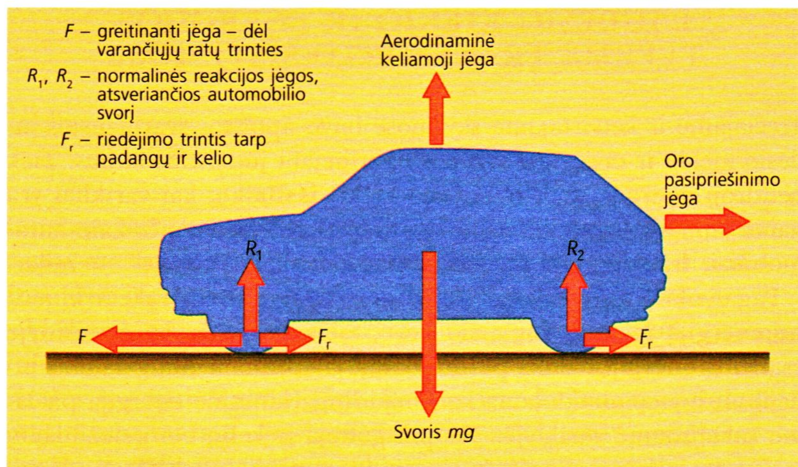
a)



b)

8.1 pav. a) **Raštuotas padangos paviršius;** b) **Padangos atspaudas, iš kurio galima spręsti apie sąlyčio su pagrindu plotą**

8.2 pav. **Greitėjantį automobilį veikiančios jėgos (jėgas vaizduojančios rodyklės nubrėžtos nesilaikant mastelio)**



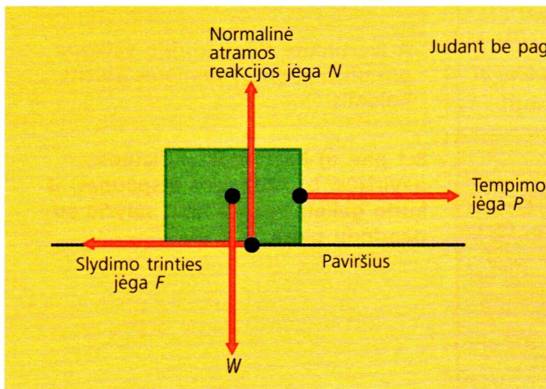
Sukantis automobilio ratui, sąlytyje su gruntu esanti padangos dalis akimirksnį nejuda grunto atžvilgiu. Jei automobilis greitėja ar yra stabdomas, tai jėga, kuri galiausiai veikia visą automobilį, turi kilti dėl trinties tarp padangų ir grunto. Jei trinties visai nebūtų, ratai suktųsi laisvai, ir automobilis nevaldomai slystų, kaip atsitinka slidžiame kelyje. 8.2 pav. parodytos jėgos, veikiančios greitėjantį automobilį.

Maksimali trinties jėgos F vertė priklauso nuo besiliečiančių paviršių savybių ir nuo tarp tų paviršių veikiančios **normalinės** jėgos N. Čia žodis „normalinė" turi specifinę matematinę reikšmę „statmena paviršiams sąlyčio taške". Ši jėga dažnai vadinama normaline *reakcija*. Sąryšis yra paprastas:

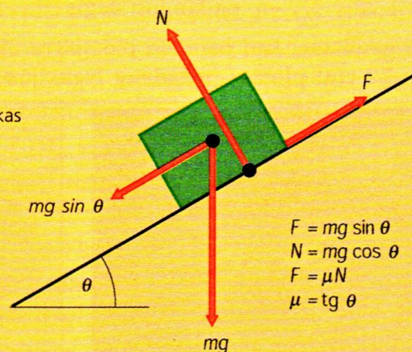
$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{\mu N},$$

kur μ – bedimensis skaičius, vadinamas trinties koeficientu. Jo dydis priklauso nuo paviršių savybių. Kai paviršiai slysta vienas kitu, koeficientas μ dažniausiai yra mažesnis nei tuo atveju, kai tie patys paviršiai nejuda vienas kito atžvilgiu. Todėl išskiriami *rimties trinties* ir *slydimo trinties* koeficientas. Rimties trinties koeficientas gumai grindinio atžvilgiu yra 0,7–0,9. Slydimo trinties koeficientas yra 0,5–0,8, tačiau, esant drėgnam keliui, jis sumažėja iki 0,25–0,7. Atkreipkite dėmesį, kad jėga F nepriklauso nuo besiliečiančių paviršių ploto. 8.3–8.6 paveiksluose pateikta keletas pavyzdžių, iliustruojančių trinties koeficiento pobūdį. 8.1 lentelėje pateiktos trinties koeficientų vertės įvairiems paviršiams.

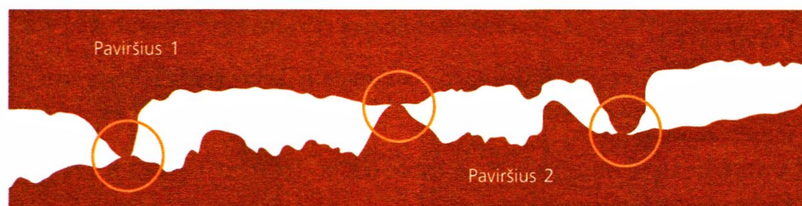
Žr. 2 klausimą. ■



8.3 pav. **Trintis plokščiame paviršiuje**



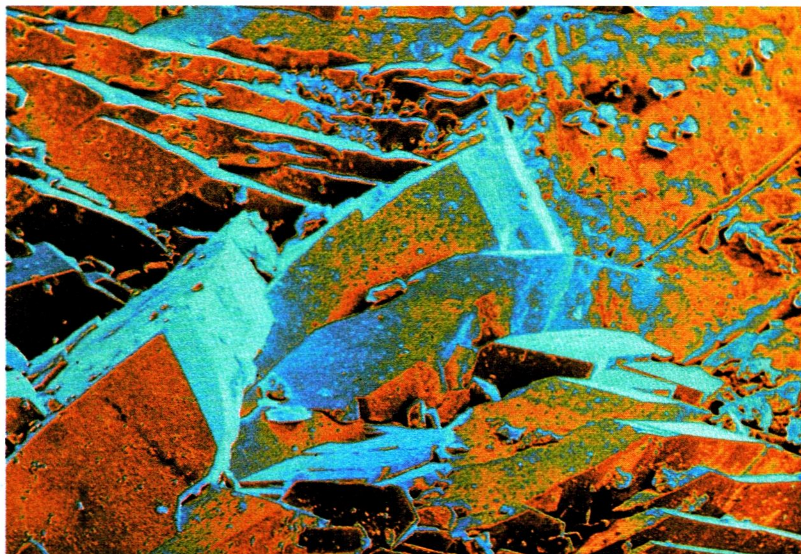
8.4 pav. **Trintis nuožulnioje plokštumoje; μ = tg θ**



8.5 pav. **Trinties jėga nepriklauso nuo ploto. Nė vienas realus paviršius nėra idealiai lygus – jis turi daug gūbrių ir įdubų. Vienam kūnui išsilaikyti sukibus su kitu pakanka ir trijų besiliečiančių gūbrių. Jei vienas iš jų judant nusitrins, tai jo vietą užims kitas. Todėl tikrasis sąlyčio plotas yra labai mažas**

8.1 lentelė. **Trinties koeficientai; jie kinta kintant temperatūrai ir drėgnumui, todėl pateiktos vertės yra apytikslės**

Paviršiai	Rimties trintis	Slydimo trintis
Plienas į plieną	0,74	0,57
Guma į betoną	0,9	0,7
Medis į medį	0,25–0,50	0,2
Ledas į ledą	0,1	0,03
Tekinto medžio paviršius į sniegą	–	0,04
Teflonas į tefloną	0,04	0,04
Žmogaus sąnarys su tepaline plėve	0,01	0



8.6 pav. **Mikrofotonuotrauka, kurioje matyti dengto metalo paviršiaus nelygumai, nors plika akimi tas paviršius atrodo lygus. Toks paviršius naudojamas variklių detalėse ir yra specialiai apdorotas, kad turėtų gerą sukibimą su tepalais**

Slydimas šlaitu

8.4 pav. parodytos jėgos, veikiančios kūną, kuris pastoviu greičiu slysta šlaitu žemyn. Kadangi jis juda be pagreičio, tai kūno svorio dedamoji, veikianti išilgai šlaito *žemyn*, turi būti lygi trinties jėgai, veikiančiai šlaito plokštumoje *aukštyn*. Trinties jėga yra μN, kur N – atramos reakcijos jėga, veikianti tarp šlaito paviršiaus ir kūno. Taigi:

$$mg \sin \theta = \mu N$$

Tačiau N taip pat yra susijusi su kūno svoriu. Faktiškai $N = mg \cos \theta$, todėl galime užrašyti

$$mg \sin \theta = \mu mg \cos \theta$$

ir supaprastinti:

$$\mu = \sin \theta / \cos \theta = \text{tg } \theta$$

Naudodamiesi šiuo sąryšiu galime labai paprastai nustatyti trinties tarp dviejų paviršių koeficientą.

Trintis ir pagreitis

Smarkūs vairuotojai įsižiebus žaliam šviesoforo signalui „kaitina padangas“, kai bando greitėti taip sparčiai, kad tam reikalinga jėga viršija rimties trinties jėgą tarp padangų ir kelio. Tada padanga juda kelio paviršiaus atžvilgiu, ir dėl darbo, atlikto įveikiant trinties jėgą, toje vietoje išsiskiria šiluma. Panašiai galite matyti slydimo žymes, kai transporto priemonė stabdoma taip stipriai, kad ratai „užsiblokuoja“, ir padangos slysta kelio atžvilgiu.



B Dviračio masė yra apie 15 kg, o vidutinė suaugusio žmogaus masė yra apie 60 kg. Imkite trinties tarp padangos ir kelio koeficientą lygų 0,8 ir įvertinkite, su kokiu maksimaliu pagreičiu galima stabdyti dviratį. Paaiškinkite, kodėl avariniu atveju saugiau dviratį stabdyti abiem stabdžiais – ir priekiniu, ir užpakaliniu.



C Kai skaičiuojamas maksimalus be slydimo įmanomas pagreitis, jėgą F galima tiksliau įvertinti stabdymo atvejui, negu greitėjimui. Kodėl?

PAVYZDYS

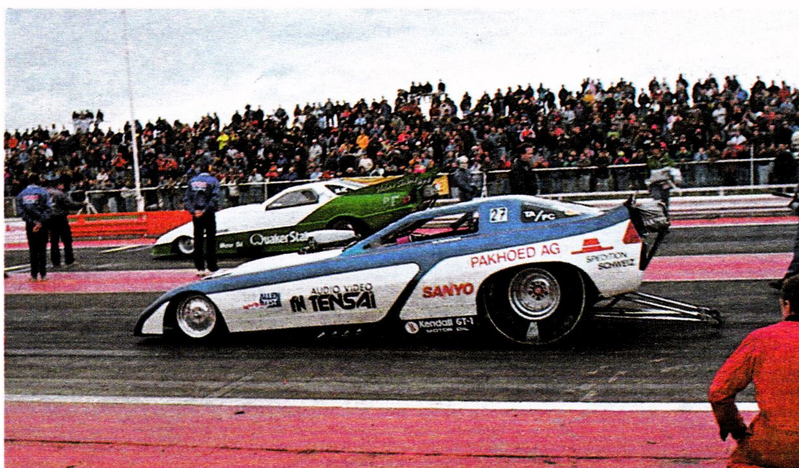
K Įprastinė rimties trinties tarp padangos ir kelio koeficiento vertė yra 0,8. Įvertinkite maksimalų pagreitį, kurį gali įgyti 1000 kg masės automobilis.

A Maksimali trinties jėga $F = \mu N = 0{,}8 \times 1000 \times 9{,}8 = 7{,}8$ kN

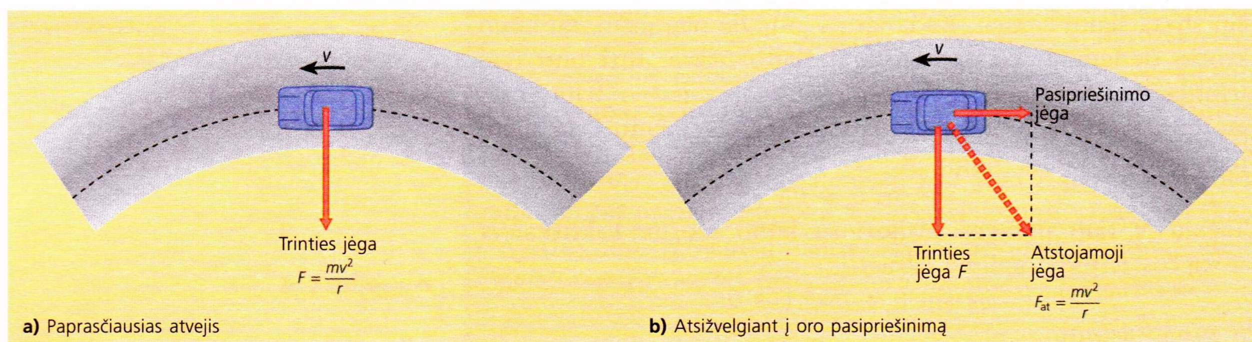
Šios jėgos sukeltas pagreitis

$$a = F/m = (7{,}8 \times 10^3)/1000 = 7{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Tačiau toks įvertinimas yra labai apytikslis. Automobilio svoris tenka ne tik dviem varantiesiems ratams, bet ir kitai ratų porai, todėl normalinė atramos reakcijos jėga N yra mažesnė nei automobilio svoris. Tai reiškia, kad maksimalus įmanomas pagreitis yra mažesnis už apskaičiuotąjį. Automobilių konstruktoriai visgi naudojasi paprasta formule $F = \mu W$, tačiau W čia yra varančiosios ašies apkrova, kurią galima išmatuoti (nors judant automobiliui tai ir nėra lengva) arba teoriškai apskaičiuoti.



8.7 pav. **Greitėjimo varžybų automobiliai konstruojami taip, kad išvystytų maksimalų pagreitį. Tam pasitarnauja dideli užpakaliniai ratai (jų perdavimo koeficientas yra didelis), o didžioji dalis automobilio svorio sutelkiama virš užpakalinių ratų**



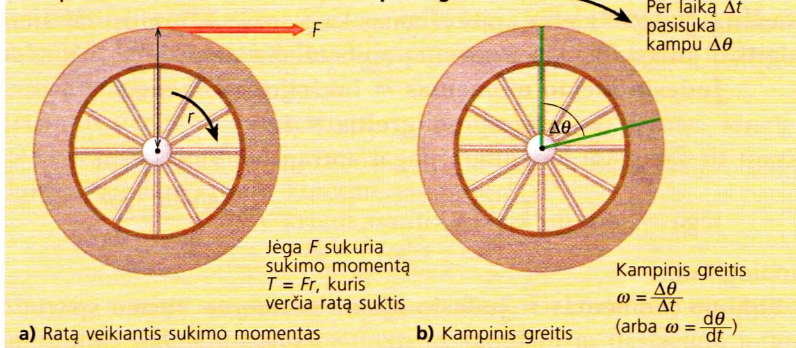
8.8 pav. **Jėgos, veikiančios automobilį posūkyje.** a) **paprasčiausias atvejis;** b) **kai atsižvelgiama į oro pasipriešinimą**

Žr. 3 ir 4 klausimus. ■

Automobilis gali slysti, jei jis verčiamas sukti per staigiai, t. y. per mažo apskritimo lanku. Automobilį judėti apskritimu turi versti įcentrinė jėga, ir vėl jos vaidmenį turi atlikti trinties tarp automobilio ir kelio jėga. 8.8a) pav. situacija pavaizduota labai supaprastintai, o b) parodytas realistiškesnis atvejis, kai atsižvelgiama ir į oro pasipriešinimą.

Ratai ir sukimosi inercija

Besisukantis ratas turi ir kinetinės energijos, ir judesio kiekį, net ir tuo atveju, kai nejuda į priekį. Kad ratas suktųsi, jį turi veikti sukimo jėga (arba **sukimo momentas**). Ta jėga atlieka darbą, kuris pasireiškia kinetinės energijos pavidalu, kaip parodyta 8.9a) pav.



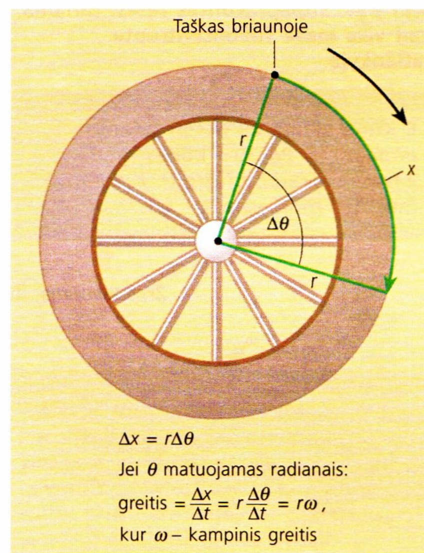
Sukimo momentas, kaip ir jėgos momentas, matuojamas niutonmetrais (N · m). Bandymai rodo, kad sunkiau įsukti didesnio skersmens ratą, negu mažesnio, net jei abiejų ratų masės yra lygios. Kaip kūno priešinimąsi judėjimui su pagreičiu vadiname *inercija* (apibūdinama mase m), taip rato priešinimąsi įsukimui veikiant sukančiai jėgai galime apibūdinti **sukimo inercija** (ji aprašoma **inercijos momentu** I). Inercijos momento dimensija yra masė × (atstumas)^2, t. y. kg · m^2. Sukimosi sparta yra matuojama kampu, kuriuo spindulys pasisuka per vieną sekundę, t. y. **kampiniu greičiu** ω, kaip atspindi 8.9b) pav. Kampinis greitis matuojamas radianais per sekundę. Ir greitis, ir kampinis greitis yra vektoriai. **Kampinį pagreitį** pažymėję α, galime palyginti tiesiaeigį ir sukamąjį judėjimus:

Jėga = masė × pagreitis

$$F = ma$$

Sukimo momentas = inercijos momentas × kampinis pagreitis

$$T = I\alpha$$



8.10 pav. **Rato briaunoje esančio taško nueitas kelias ir kampinis greitis**

PAVYZDYS

K 20 N · m sukimo momentas pradeda veikti ratą, kuris iš pradžių nesisuko. Rato inercijos momentas yra lygus 600 kg · m^2.

a) Kokiu kampiniu pagreičiu judės ratas?

b) Kokiu kampiniu greičiu ratas judės po 2 minučių?

c) Rato spindulys lygus 30 cm. Kokiu greičiu (metrais per sekundę) tuo metu judės jo briaunos taškai?

A

a) Kampinis pagreitis = sukimo momentas/inercijos momentas:

$$\alpha = 20/600 = 0{,}033 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

b) Kampinis greitis = kampinis pagreitis × laikas

$$= 0{,}033 \times 120 = 4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

c) Žr. 8.10 pav. Pagal radiano apibrėžimą:

briaunos taško kelias, nueitas per sekundę
= kampas, kuriuo pasisuko per sekundę, × spindulys

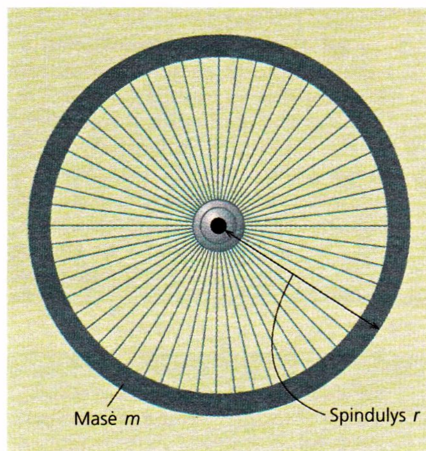
Taigi briaunos taško greitis yra 4 × 0,30 = 1,2 m · s^{-1}.

?

D Pramogų parke esančios karuselės spindulys 15 m. Judėdama maksimaliu greičiu ji apsisuka per 2 s.

a) Koks jos kampinis greitis?

b) Kokiu greičiu metrais per sekundę juda karuselės pakraštyje esantis krėslas?



8.11 pav. **Supaprastintas ratas: tariama, kad visa masė sukoncentruota ratlankyje**

?

E Kūną veikia 25 N · m sukimo momentas. Po 30 s kūnas įgijo 2 rad · s^{-1} kampinį greitį. Koks jo inercijos momentas?

Žr. 5 klausimą.

Judesio kiekio momentas

Kadangi judesio kiekis apibrėžiamas kaip masė × greitis, tai analogiškai judesio kiekio momentą apibrėžiame taip:

Judesio kiekio momentas = inercijos momentas × kampinis greitis = $I\omega$

Esant tiesiaeigiam judėjimui, pagal antrąjį Niutono dėsnį

jėga = judesio kiekio kitimo sparta $F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{\Delta P}{\Delta t}$,

analogiškai

Sukimo momentas = judesio kiekio momento kitimo sparta

$$T = \frac{\Delta(I\omega)}{\Delta t}$$

Paprasto rato inercijos momentas

Rato konstrukciją galima supaprastinti taip, kaip pavaizduota 8.11 pav. Darome prielaidą, kad stipinų masė nykstamai maža palyginti su apvado mase.

Kadangi visa masė (m) sukoncentruota tame pačiame atstume r nuo sukimosi centro, inercijos momentas paprasčiausiai lygus mr^2.

Įprastinių kūnų inercijos momentas

Daugeliu atvejų besisukančio rato masė nėra tolygiai pasiskirsčiusi jo ratlankyje. Inercijos momentą galima apskaičiuoti, jei masės pasiskirstymas yra gana paprastas, tačiau praktikoje gali tekti jį matuoti eksperimentiškai. Pavyzdžiui, automobilio rato inercijos momentą apskaičiuoti matematiškai yra gana sunku. Kai kurių paprastų formų kūnų inercijos momentai pateikti 8.2 lentelėje. Atkreipkite dėmesį, kad vertės priklauso nuo to, kokios ašies atžvilgiu kūnas yra sukamas.

8.2 lentelė. **Paprastų kūnų inercijos momentai**

Kūnas	Sukimosi ašis	Inercijos momentas (m = kūno masė)
Plonas žiedas (supaprastintas ratas)	Per centrą, statmenai plokštumai	mr^2
Plonas žiedas	Išilgai skersmens	$\frac{1}{2}mr^2$
Diskas arba cilindras (smagratis)	Per centrą, statmenai plokštumai	$\frac{1}{2}mr^2$
Plonas d ilgio strypas	Per centrą, statmenai strypui	$\frac{1}{12}md^2$

Besisukančio kūno energija

Besisukančio kūno kinetinė energija lygi $\frac{1}{2}I\omega^2$. Palyginkite besisukančio kūno kinetinės energijos formulę su analogiška formule tiesiaeigiam judėjimui $\frac{1}{2}Iv^2$.

Jei ratas dar ir rieda greičiu v, tai jis turės ir *transliacinės* kinetinės energijos $\frac{1}{2}Iv^2$.

Suminė riedančio rato kinetinė energija E_K:

$$E_K = \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

Masyvių transporto priemonių (pavyzdžiui, elektrovežių) energijos nuostolius stabdant galima sumažinti kaupiant jų tiesiaeigio judėjimo kinetinę energiją sukamojo judėjimo energijos pavidalu masyviame besisukančiame rate (smagratyje). Stabdoma ne įprastiniais stabdžiais, pagrįstais trinties veikimu, o kitokiu principu – riedančiuosius ratus per perdavimo sistemą sujungiant su smagračiu. Riedantiesiems ratams lėtėjant, smagratis greitėja, ir atvirkščiai.

Judesio kiekio momento tvermė

Paimkite dviračio rato ašį abiem rankom ir paprašykite draugo, kad įsuktų jį vertikalioje plokštumoje. Po to pabandykite pakreipti ratą nedideliu kampu nuo vertikalės. Jūs pajusite paslaptingą jėgą, kuri tarytum priešinasi sukimosi ašies pakreipimui. Iš tikrųjų tai atsitinka dėl judesio kiekio momento tvermės ir trečiojo Niutono dėsnio. Sukimosi ašies krypties pakeitimas reiškia judesio kiekio momento pokytį: nors jo dydis ir nekinta, tačiau keičiasi kryptis. Tai gali įvykti tik veikiant jėgai. Kadangi jėgos veikia poromis, tai kintant sukimosi rato krypčiai, atsiranda tokio paties dydžio, tik priešingos krypties jėga, veikianti jūsų rankas. Šis besisukančio rato „priešinimasis“ jo ašies krypties pokyčiams ir suteikia dviračiui stabilumą. Tačiau tik tol, kol sukasi jo ratai! Judesio kiekio momento tvermės svarba Saulės sistemos kilmei ir pobūdžiui aprašyta 27 skyriuje (2-oje d.).

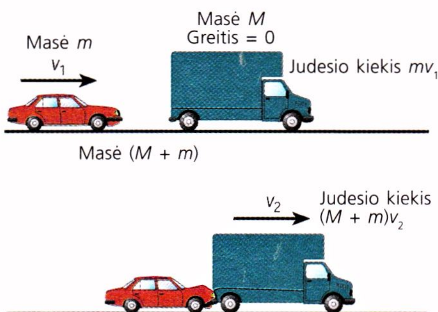
✓ Trečiasis Niutono dėsnis teigia, kad, kai sąveikaujant dviem kūnams, vienas iš jų (mūsų atveju ratą laikantis žmogus) veikia kitą kūną (ratą) tam tikra jėga, tai pastarasis veikia pirmąjį to paties dydžio, bet priešingos krypties jėga.

2 SMŪGIAI

Daugumoje transporto avarijų įvyksta **smūgiai** – tarp transporto priemonių, tarp transporto priemonių ir statinių, taip pat tarp transporto priemonių ir pėsčiųjų. Smūgius, kurių metu konstrukcijos deformuojamos negrįžtamai, vadiname netampriais (daugiau apie **tamprumą** žr. 97 psl.). Pradinė kinetinė susiduriančių kūnų energija dažniausiai virsta šiluma, dėl kurios šyla kūnai ir aplinka. Kinetinė energija išsilaiko tik smūgiuose tarp idealiai tamprių kūnų. Nė vienas iš kūnų, su kuriais susiduriame kasdieniniame gyvenime, nėra idealiai tamprus, tačiau guminių kamuoliukų, „superkamuoliukų“, plieninių rutuliukų ar biliardo rutulių elgesys yra artimas tampriam.

■ Žr. 6 klausimą.

Nuo susidūrimų tarp *dalelių* (molekulių, atomų, elektronų ir pan.) didžiąja dalimi priklauso viskas, kas vyksta fizikoje, ir šie susidūrimai dažnai yra visiškai tamprūs, jei dalelės juda pakankamai mažais greičiais. Jei greičiai per dideli, įvyksta cheminiai pokyčiai. Priešpriešinių pluoštų *greitintuvuose* net atomai yra suardomi arba įvyksta kiti dramatiški vyksmai. Tačiau kurdami savo kinetinės dujų teorijos modelį (žr. 157 psl.) darome prielaidą, kad smūgiai tarp atomų ar molekulių yra visiškai tamprūs.

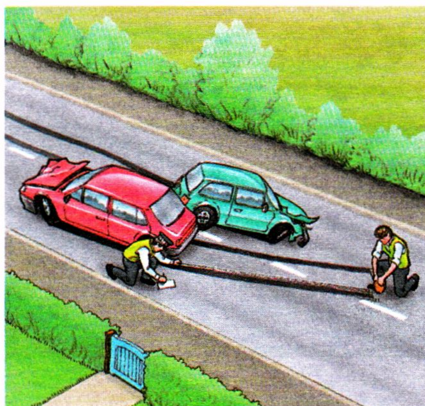


8.12 pav. **Netamprus smūgis: lengvasis automobilis atsitrenkia į sunkvežimį**

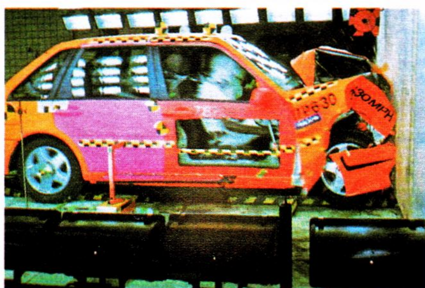
?

F Transporto avarijose patiriami dideli materialiniai nuostoliai, nes netamprios medžiagos sulankstomos ar suardomos. Šių nuostolių nebūtų, jei būtų naudojamos idealiai tamprios medžiagos. Ar tai gera idėja?

Žr. 7 klausimą.



8.13 pav. **Autoįvykio vietoje išmatavus slydimo žymes galima apskaičiuoti automobilių greičius prieš smūgį**



8.14 pav. **Gniuždymo sritis sulėtina susiduriančio automobilio pagreitį ir sumažina keleivių sužalojimus**

Tiesioginiai smūgiai

1 Netamprūs smūgiai

Paprasčiausias netampraus smūgio pavyzdys yra toks smūgis, kai judančiam kūnui (pavyzdžiui, automobiliui) atsitrenkus į nejudantį, jie staiga deformuojasi ir net kurį laiką juda kartu. Tai – būdinga situacija automobilių susidūrimuose (žr. 8.12 pav.). Sistema yra izoliuota, todėl suminis judesio kiekis smūgio metu nepakinta:

judesio kiekis prieš smūgį = judesio kiekis po smūgio

Laikantis paveiksle pateiktų žymenų:

$$mv_1 = (M + m)v_2$$

Tarkime, 1000 kg masės automobilis atsitrenkia į sunkvežimį judėdamas 30 m · s^{-1} greičiu (tik truputį mažesniu nei leistinas 70 mylių per valandą greitis). Sunkvežimio masė 9000 kg. Tada:

$$1000 \times 30 = 10\ 000 \times v_2,$$

kur v_2 = 3 m · s^{-1}.

Sukibę automobiliai pradeda judėti 3 m · s^{-1} greičiu, tačiau sunkvežimis greitai sustos, jei buvo paliktas su įjungtu rankiniu stabdžiu. Automobilių avarijų ekspertai, atlikę matavimus įvykio vietoje, gali įvertinti šį pradinį sukibusių automobilių greitį ir apskaičiuoti, kokiu greičiu automobilis atsitrenkė į sunkvežimį, bei nustatyti, ar jis neviršijo leistino greičio (8.13 pav.).

Energijos pokytis netampraus susidūrimo metu

Automobilio kinetinė energija prieš smūgį ($\frac{1}{2}mv^2$) lygi 450 kJ. Transporto priemonės po smūgio juda turėdamos tik 45 kJ kinetinės energijos. Taigi tik 10% pradinės energijos išlieka po smūgio kartu judančių transporto priemonių kinetinės energijos pavidalu. (Apskaičiuokite šias vertes patys.) Prarandant kinetinę energiją kilo daug triukšmo, tačiau didžioji energijos dalis buvo suvartota deformavimui (darbo atlikimui) ir galiausiai virto šiluma transporto priemones sudarančiose medžiagose. Transporto priemonės konstruojamos taip, kad jose esančių žmonių kūnus pasiektų kiek galima mažesnis šios energijos *kiekis* ir jos perdavimo *sparta* būtų kuo mažesnė. Šios priemonės – tai apsauginis karkasas, gniuždymo sritis, saugos diržai, atsparūs smūgiams priekiniai ratai, sluoksniuotieji stiklai ir greitai prisipučiančios oro pagalvės.

Judesio kiekis, jėga ir energija avarijos metu

Pagrindiniai sąryšiai čia sieja:

- kinetinę energiją ir konstrukcijų deformavimo metu atliktą darbą,
- impulsą ir judesio kiekio pokytį (tai nulemia atsirandančią jėgą).

Įsivaizduokite automobilį, atsitrenkiantį į labai masyvią konstrukciją, pavyzdžiui, betono sieną. 8.14 pav. parodyta, kas šioje situacijoje atsitinka automobiliui.

Automobilį veikiančios jėgos deformuoja jį atlikdamos darbą. Atliktą darbą aprašo formulė $W = Fd$. Čia supaprastiname sudėtingą situaciją tarę, kad F – tai vidutinė jėga, veikianti, kol automobilis sustoja, o d – kelias, kurį automobilio masės centras paslenka automobilio priekiui atsitrenkus į sieną. Dalis automobilio kinetinės energijos virsta garsu ir perduodama smulkioms medžiagos dalelėms, kurios išsilaksto smūgio metu, tačiau ši dalis

yra labai maža palyginti su energija, kuri suvartojama konstrukcijų deformacijai. Todėl galima teigti, kad:

$$\frac{1}{2}mv^2 = Fd$$

Tam tikro automobilio, judančio tam tikru greičiu, patiriamą jėgą F galima sumažinti padidinus d. Būtent taip ir veikia lengviau deformuojama „gniuždymo sritis" automobilio priekyje. Kai variklio skyrius sugniuždomas, jis ne tik sugeria dalį energijos, bet ir pailgina kelią, kurį iki sustojimo nueina už variklio esantis apsauginis metalo karkasas. Šis metalinis karkasas yra pakankamai tvirtas, kad išlaikytų smūgio metu atsiradusias jėgas nelūždamas ir stipriai nesideformuodamas. Todėl keleivių nesužaloja automobilio korpuso gabalai. Tačiau ši priemonė negelbės, jei keleiviai gali laisvai judėti ir susidurti su kietu sparčiai lėtėjančio automobilio metalu.

■ Žr. 8, 9 ir 10 klausimą.

Judesio kiekio svarba

Vienaip ar kitaip, vairuotojas ir keleiviai yra priverčiami sustoti, o saugos priemonės automobilyje mažina neigiamą pagreitį sukeliančias jėgas, kad jos padarytų kiek galima mažiau žalos. Automobilio prietaisų skydas (priekinis panelis) esti apmuštas minkšta medžiaga. Vairas sukonstruotas taip, kad greičiau išlūš nei sutraiškys vairuotojo krūtinę ar galvą. Dauguma naujų automobilių dabar turi oro pagalves, kurios labai greitai prisipučia, kai automobilio greitis staigiai mažėja. Pagalvė apgaubia vairą ir vairuotojui suteikia neigiamą pagreitį lėčiau nei būtų esant tiesioginiam sąlyčiui su vairu. Šių ypatumų fiziką lengviau suprastume remdamiesi judesio kiekio ir jėgos impulso sąvokomis:

Jėgos impulsas = judesio kiekio pokytis

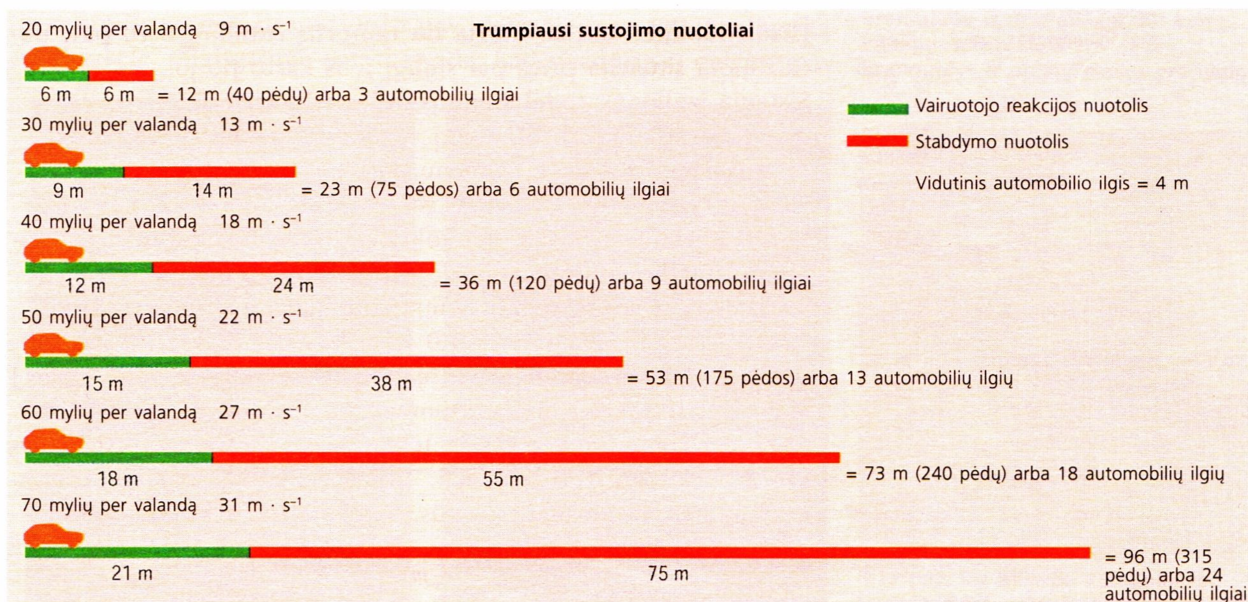
$F\Delta t = \Delta(mv) = m\Delta v$ (m yra konstanta)

Iš čia:

$$F = m\Delta v/\Delta t$$

F yra jėga, kuriai veikiant pakinta judesio kiekis. Automobilio smūgio metu m masės žmogaus kūnas, judėjęs pradiniu greičiu v,

8.15 pav. **Sustojimo nuotoliai, esant skirtingiems greičiams (šaltinis: Autostradų kodeksas, *Higway Code*)**



PAVYZDYS

K Įvertinkite, kokio dydžio jėga veikia vairuotoją, kai 13,6 m · s^{-1} (t. y. 30 mylių per val.) greičiu važiuojantis automobilis staiga stabdomas, kol visiškai sustoja. Pagal Autostradų kodekso duomenis, kaip pavaizduota 8.15 pav., automobilis, kurio greitis 13,6 m · s^{-1}, normaliai stabdomas sustoja už 14 m. (Vidutinio vairuotojo masė yra 65 kg.)

A Laiką, per kurį automobilis sustoja, pažymėkime t. Jį galime rasti iš sąryšio:

Nueitas kelias = vidutinis greitis × laikas

$$14 = \frac{13{,}6 + 0}{2} t$$

iš kur:

$$t = 2{,}06 \quad \text{s}$$

Kadangi jėgos impulsas = judesio kiekio momento pokyčiui, t. y. $F\Delta t = m\Delta v$, užrašome:

$$F \times 2{,}06 = 65 \times 13{,}6$$

arba: $F = 429$ N

Ši jėga mažesnė nei vairuotojo svoris (tarkime, maždaug 600 N), todėl jo kojoms tokia apkrova yra normali.

Smūgio metu tiek automobilis, tiek ir vairuotojas sustoja per 0,1 s.

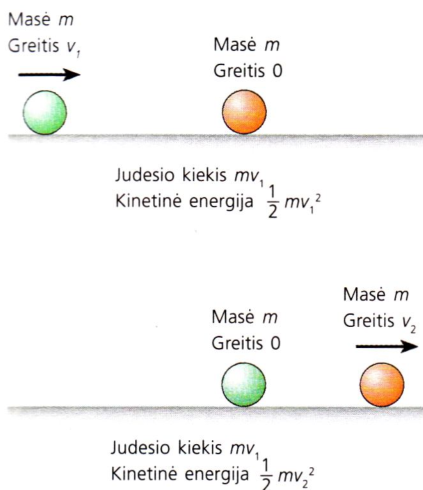
Taigi sustojimo trukmė sutrumpėja nuo 2,06 s iki 0,1 s, maždaug 20 kartų. Tiek pat kartų, iki 8600 N, išauga ir jėga. Dabar ji 13 kartų viršija kūno svorį.

Praktikoje situacija yra dar sudėtingesnė, nes skirtingas kūno dalis veiks skirtingos jėgos. Pavyzdžiui, nors ir prisegtas saugos diržais, kūnas suksis pėdų atžvilgiu ir gali atsitrenkti į vairą ar priekinį stiklą.

yra sustabdomas. Tam reikalinga jėga atsiranda veikiant saugos diržams ir šiek tiek padedant į grindis atremtoms kojoms. Panagrinėkime jėgas, veikiančias, kai automobilis stabdomas iki visiško sustojimo.

Saugos diržai

Visiškai netąsūs saugos diržai yra blogesni. Jie sustabdo kūną tuo pat momentu, kai sustoja automobilis, ir vairuotojo kūną veikia didelė jėga (apskaičiuota anksčiau). Saugos diržo medžiaga parenkama tokia, kad netrūkdama išsitemptų tiek, jog kūnas dar judėtų į priekį automobiliui jau sustojus. Vairuotojas sustoja per ilgesnį laiką nei automobilis, todėl jį veikia mažesnė jėga F, kas akivaizdu iš sąryšio $F = m\Delta v/\Delta t$.



8.16 pav. **Tamprusis smūgis: $v_1 = v_2$**

2 Tamprieji smūgiai

Įsivaizduokite, kad susiduria du tamprūs rutuliai. 8.16 pav. pavaizduota situacija prieš pat smūgį ir iš karto po jo.

Sistema izoliuota, todėl suminis judesio kiekis nekinta, t. y.:

judesio kiekis prieš smūgį = judesio kiekiui po smūgio

Jei laikysimės 8.16 pav. žymenų, tai

$$mv = mv_1 + mv_2$$

Iš šios formulės neaišku, nei kokia kryptimi juda rutuliai, nei kokie jų santykiniai greičiai.

Tarkime, v = 10 m · s^{-1} ir abiejų rutulių masės m yra 1,0 kg.

Tada: $1{,}0 \times 10 = 1{,}0 \times v_1 + 1{,}0 \times v_2$,

supaprastinus galima užrašyti: $v_1 = 10 - v_2$ [1]

Žr. 11 klausimą.

Šioje lygtyje turime du nežinomuosius, ir, atrodytų, galime pasirinkti bet kokias greičių vertes, tenkinančias sąlygą, kad kairioji lygybės pusė būtų lygi dešiniajai. Tačiau čia galioja dar vienas dėsnis: rutuliai yra idealiai tamprūs, todėl *kinetinė energija išsilaiko*:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

Šią lygčių sistemą galime išspręsti įrašę v_1 vertę (ją išreiškę per v_2) iš lygties [1] ir supaprastinę iki tokio pavidalo:

$$(10)^2 = (10 - v_2)^2 + v_2^2 \qquad [2]$$

Iš čia gauname kvadratinę lygtį:

$$v_2^2 - 10v_2 = 0$$

Turime du šios lygties sprendinius: antrojo rutuliuko greitis v_2 yra arba 0, arba 10 m · s^{-1}. Sprendinys $v_2 = 0$ neturi fizikinės prasmės: pirmasis rutuliukas turėtų 10 m · s^{-1} greičiu pralėkti tiesiog kiaurai pro antrąjį. Tačiau antrasis rutuliukas gali laisvai judėti, todėl antrasis sprendinys rodo, kad šis rutuliukas judės tuo pačiu greičiu, kuriuo prieš smūgį judėjo pirmasis rutuliukas. Šį efektą iliustruoja žaislas, vadinamas Niutono lopšiu (8.17 pav.), tačiau iliustruoti teoriją galima ir smogiant ant lygaus stalo viena moneta į kitą. Pirmajam rutuliukui nelieka judesio kiekio, todėl jis sustoja.

Paprasti eksperimentai su rutuliukais ar monetomis demonstruoja, kad lengvam kūnui trenkus į nejudantį masyvų kūną, lengvasis kūnas greičiausiai atšoks atgal, o didysis kūnas pajudės pirmyn. Kai didelės masės kūnas susiduria su nejudančiu mažos masės kūnu, abu juda į priekį, ir lengvasis juda greičiau.



8.17 pav. **Niutono lopšys. Kraštinis dešinysis rutuliukas ką tik atsitrenkė į savo kaimyną, o kraštinis kairysis atšoko į šoną**

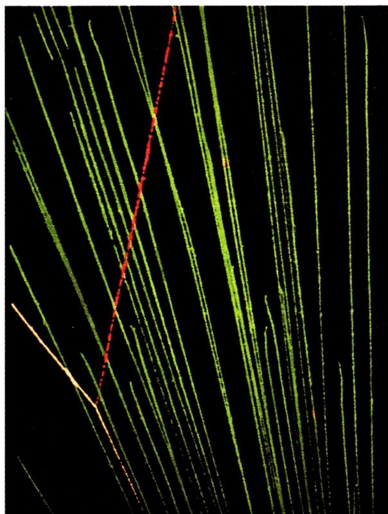
?

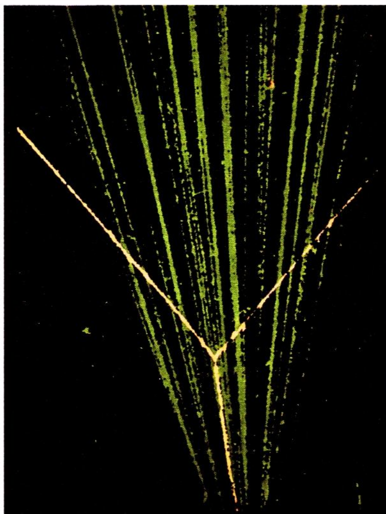
G Didelis ir mažas plieniniai rutuliukai juda priešingomis kryptimis ir tampriai susidūrę atšoka. Pavaizduokite, kaip smūgio metu veikiančios abu rutuliukus jėgos priklauso nuo laiko.

Netiesioginiai smūgiai

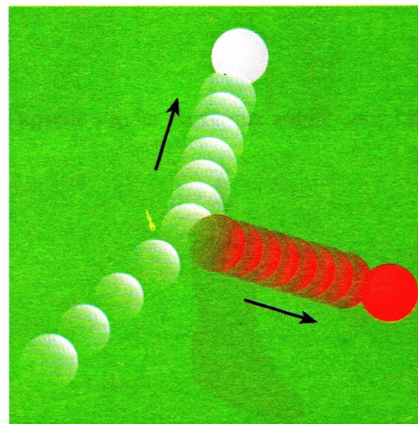
Du būdingų smūgių tarp dviejų dalelių Vilsono kameroje pavyzdžiai parodyti 8.18 pav. Šis prietaisas išnagrinėtas 18 skyriuje. Čia jonizuotų dalelių, pavyzdžiui, vandenilio ar helio branduolių kelias matomas kaip siaura vandens debesėlių juosta. Ji susidaro išilgai dalelės trajektorijos, kuria dalelė skrieja pro persotintus vandens garus.

Abiejose 8.18 pav. fotografijose dalelė, įskriejusi iš apačios susiduria su kameroje esančių dujų atomu. Atomas jonizuojamas, ir jo branduolys nulekia palikdamas pėdsaką. Pirmoji dalelė smūgio metu keičia kryptį ir sukuria kitą šakelės pavidalo pėdsako šaką. 8.19 pav. iliustruoja analogišką įvykį ant biliardo stalo. Atkreipkite dėmesį, kad po susidūrimo biliardo kamuoliai nurieda trajektorijomis, kurios sudaro statų kampą. Tai dėl to, kad jų masės lygios. Kad kampas turi būti status, išplaukia iš judesio kiekio ir energijos tvermės dėsnių. 8.18 pav. dešinėje parodyta analogiška 90° šakelė, taigi galime daryti išvadą, kad susidūrusių dalelių ma-





8.18 pav. **Vilsono kameros vaizdas, kuriame matomi judančių dalelių pėdsakai. Kairėje alfa dalelės (žali pėdsakai) šauna į viršų pro kameroje esančias vandenilio dujas, ir viena alfa dalelė (geltonas pėdsakas) susiduria su vandenilio branduoliu (raudonas). Dešinėje alfa dalelė susiduria su helio branduoliu ir abu atšoka 90° kampu, kadangi alfa dalelė yra helio branduolys ir abiejų masės yra lygios**



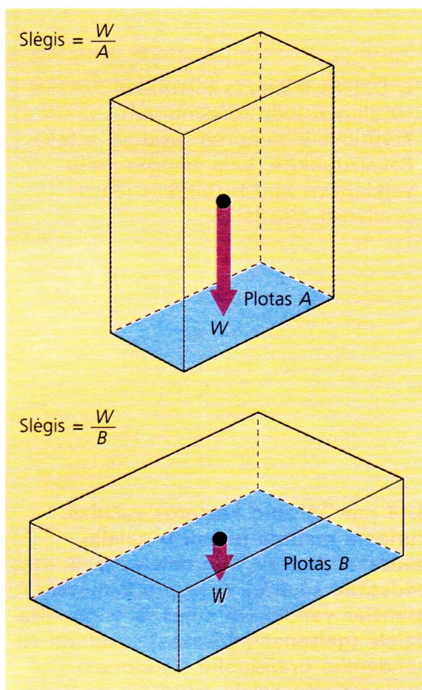
8.19 pav. **Du biliardo kamuoliai po smūgio atšoka 90° kampu**

sės yra lygios. Šiame eksperimente pirmoji dalelė buvo alfa dalelė, išspinduliuota iš radioaktyvios medžiagos.

Didžioji dalis dujų Vilsono kameroje buvo helis. Taip gautas įrodymas, kad alfa dalelė yra tapati su helio branduoliu. Naudojantis šios rūšies rezultatais, ankstyvajame branduolio fizikos vystymosi etape buvo nustatomos dalelių santykinės masės ir taip identifikuojamos dalelės.

8.18 pav. kairėje parodyta, kad krintanti alfa dalelė nukrypo ne tiek, kiek dalelė 8.18 pav. dešinėje. Tai rodo, kad ji veikiausiai susidūrė su mažesnės masės branduoliu. Iš tikrųjų tas branduolys buvo vandenilio. Šios nuotraukos yra specialiai parinktos. Jos nufotografuotos reikiamu kampu – susidūrimai vyksta trimatėje erdvėje, todėl 90° kampas matysis tik atsitiktinai. Praktikoje tyrinėtojai daro stereoskopines nuotraukas, iš kurių jie gali teisingai įvertinti kampus, nepriklausomai nuo to, kokie jie yra erdvėje.

Žr. 12 klausimą.



8.20 pav. **Plyta, kurios svoris *W*, gali sukelti skirtingo dydžio slėgį**

3 SKYSČIAI IR DUJOS, PLŪDURIAVIMAS IR SKRYDIS

Oro judėjimas išgaubtu paviršiumi sukelia jėgas, kurių dar nežinojome ir dėl kurių veikimo sunkesni už orą kūnai gali skraidyti. Šias jėgas galima paaiškinti remiantis Niutono dėsniais. Nuo jų taip pat priklauso vandens tekėjimo pobūdis, pavyzdžiui, vamzdžiuose ar upėse.

Niutono judėjimo dėsnių pasireiškimas dujose ir skysčiuose geriausiai apibūdintas šveicarų matematiko Danieliaus Bernulio (*Daniel Bernoulli,* 1700–1782) suformuluotame teiginyje, kuris vadinamas **Bernulio dėsniu.** Šiame poskyryje aptariamos ir kitos svarbios sąvokos – skysčių ir dujų **slėgis, slėgio jėga** ir **klampumas** (taip vadinama skysčių ir dujų *vidinė trintis*). Nagrinėsime **hidrostatiką** ir **hidrauliką.** Tai susiję su skysčių ir dujų elgesiu ir panaudojimu veikiant slėgiui. Susidursime ir su skysčių bei dujų atsaku į išorines jėgas. Šias savybes patogiausia aiškinti naudojantis **kinetine medžiagos teorija,** nagrinėta 7-ame skyriuje.

Slėgis

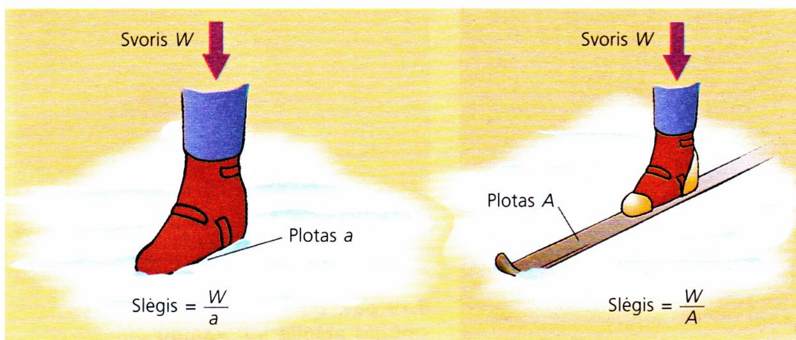
Slėgis yra apibrėžiamas kaip *jėga, veikianti paviršiaus ploto vienetą* (žr. 8.20 pav.):

Slėgis = jėga/plotas

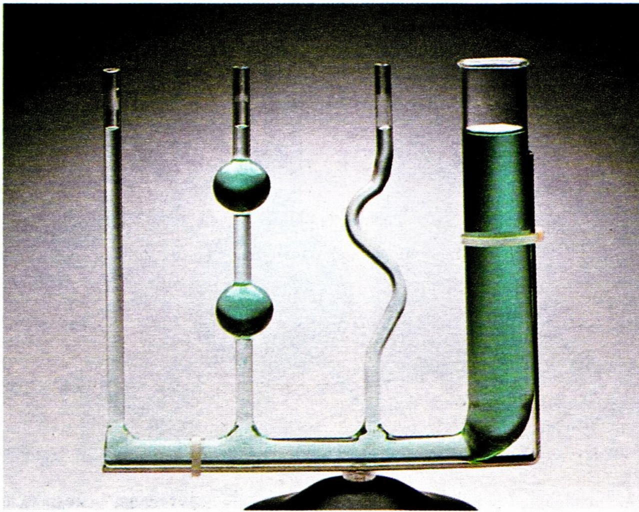
$$P = F/A$$

Slėgis yra skaliarinis dydis. Jo matavimo vienetas – niutonas į kvadratinį metrą. Šis slėgio vienetas turi specialų vardą – paskalis (Pa): 1 paskalis = 1 N · m^{-2}. 8.21 pav. parodytas paprastas pavyzdys, kaip ta pati jėga sukelia skirtingus slėgius, kai slidininko svoris veikia slidę ir tiesiogiai sniegą. Didelis slidės plotas „išsklaido apkrovą“, ir kūno svorį minkštas sniegas išlaiko lengviau.

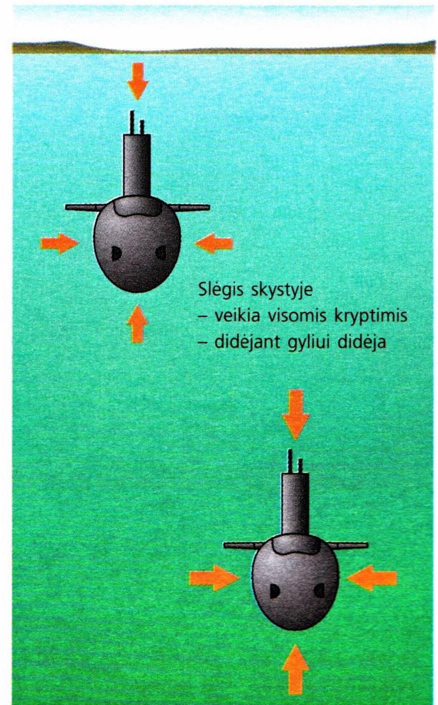
8.21 pav. **Slidės sumažina slėgį į sniegą**



Slėgis skysčiuose



8.22 pav. **Skystis išlaiko tą patį lygį**



8.23 pav. **Skirtinguose gyliuose esančius povandeninius laivus veikia skirtingi slėgiai**

Slėgis skysčiuose pasižymi tam tikrais ypatumais, kuriuos iliustruoja 8.23 pav. Teorija ir eksperimentas rodo, kad skysčiuose:

- Didesniame gylyje slėgis didesnis.
- Tam tikrame skysčio taške slėgis toks pat visomis kryptimis.
- Skystis gali *perduoti* slėgį, sukeltą vienoje skysčio vietoje, kad jis pasireikštų kitoje vietoje.

Pažvelkite į 8.31 pav., kuriame pavaizduotas hidraulinis presas, iliustruojantis trečiąjį teiginį.

Hidrostatinis slėgis

Slėgį į cilindrinio stiklainio dugną sukelia skysčio svoris ir atmosferos virš skysčio paviršiaus slėgis (8.24 pav.).

Dabar panagrinėkime slėgį P, sukeltą *vien skysčio*.

Skysčio tankis ρ. Taigi vandens masė cilindre:

$$m = \text{tūris} \times \text{tankis} = Ah\rho$$

Šio vandens svoris yra lygus $mg = Ah\rho g$ ir jis veikia į plotą A. Todėl slėgis P (ploto vienetą veikianti jėga), kurį į cilindro dugną sukelia skystis, yra toks:

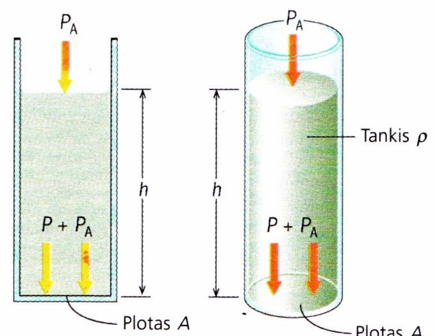
$$P = mg/A = h\rho g$$

Toks slėgis veiks bet kokį kūną, panardintą į šį gylį. Jei cilindro šone padarysite mažą skylutę, vanduo trykš į šoną. Galbūt šiek tiek stebina, kad slėgis veikia *visomis kryptimis*, ne tik žemyn, kaip, sakykime, anksčiau pateiktame pavyzdyje su slidėmis.

Dujų ar skysčio sukelta jėga dažnai vadinama **slėgio jėga:**

Slėgio jėga = slėgis × plotas

$$\boldsymbol{F = PA}$$



8.24 pav. **Skysčio slėgis cilindre**

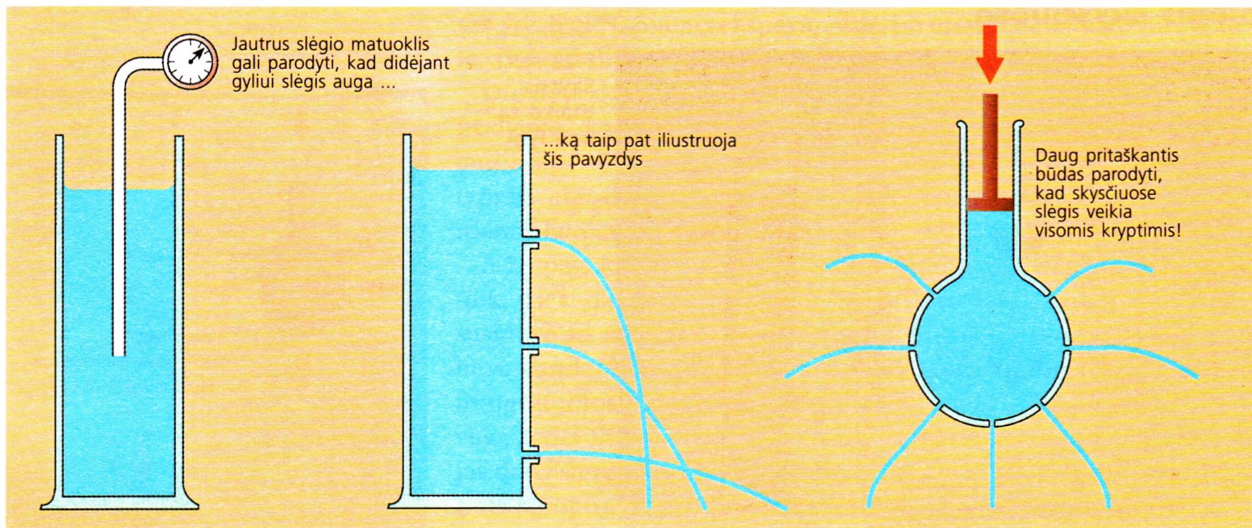
Galime tikėtis, kad bet kuriame aukštyje virš dugno slėgis bus mažesnis. Pavyzdžiui, gylyje y slėgis turėtų būti $y\rho g$.

Paprasti eksperimentai, parodyti 8.25 pav., patvirtina, kad slėgis auga didėjant gyliui ir kad jis veikia visomis kryptimis.

Panagrinėkime labai ploną skysčio sluoksnį, esantį gylyje y. Žemyn sluoksnį veikia virš sluoksnio esančio skysčio svoris, lygus $Ay\rho g$. Sluoksnis yra pusiausvyroje (stacionarus), todėl jį turi veikti ir aukštyn nukreipta jėga, kompensuojanti žemyn veikiančią jėgą. Ši jėga gali atsirasti tik dėl gylyje y veikiančio slėgio P. Reiškia:

$$PA = Ay\rho g$$

■ Žr. 14 ir 15 klausimus.



8.25 pav. **Slėgis auga didėjant gyliui ir veikia į visas puses**

H Įvertinkite, koks papildomas slėgis veikia jūsų kūną, kai baseine paneriate į 3 m gylį. (Vandens tankis 1000 kg · m^{-3}.)

Iš čia: $P = y\rho g$,

kur y – atstumas nuo sluoksnio iki paviršiaus. Tai pagrindinis **hidrostatikos** mokslo sąryšis. Ši paprasta formulė galioja skysčiams, kurių tankis pastovus. (Dujos spaudžiamos susitraukia, todėl jų tankis padidėja. Su šia sunkinančia aplinkybe dar susidursime vėliau.)

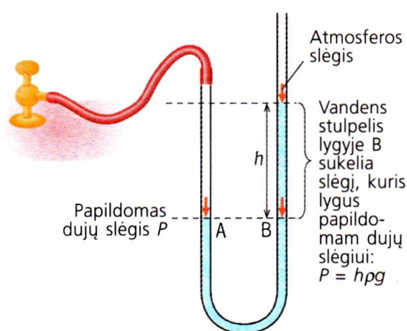
Skysčių ir dujų slėgio matavimas

Paprastas **manometras,** naudojamas slėgiui matuoti dujų tiekimo sistemoje, pavaizduotas 8.26 pav. Papildomas dujų slėgis palyginus su atmosferiniu slėgiu atsveria vandens stulpelio slėgį.

Skysčio stulpelio slėgis, $h\rho g$, yra lygus papildomam dujų tiekimo sistemos slėgiui.

Barometras naudojamas atmosferos slėgiui matuoti. Pirmuosiuose barometruose buvo naudojamas gyvsidabrio stulpelis, kaip parodyta 8.27 pav. Oro slėgis veikia gyvsidabrio paviršių inde. Šis slėgis perduodamas skystyje ir sukelia jėgą, veikiančią gyvsidabrio stulpelio pagrindą. Ši jėga tiksliai atsveria stulpelio svorį. Virš stulpelio yra (beveik) vakuumas, kuris susidaro, kai gyvsidabrio stulpelis nukrinta iki lygio, atitinkančio pusiausvyrą, t. y. maždaug 76 cm virš gyvsidabrio paviršiaus inde.

Atmosferos slėgis yra lygus ρgh, kur ρ – gyvsidabrio tankis. (Prisiminkite, kad slėgis nepriklauso nuo indo ploto.)

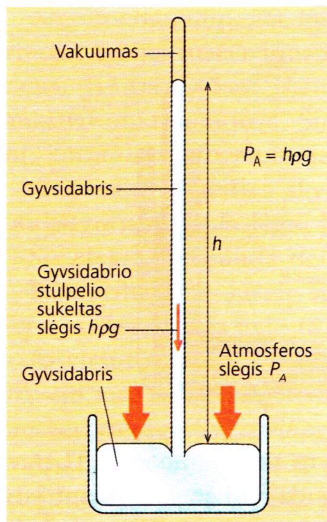


8.26 pav. **Paprastas manometras iš U formos vamzdelio**

Norint gyvsidabrio barometru atlikti tikslius matavimus, reikia įvesti pataisas dėl skysčio tankio priklausomybės nuo temperatūros. Be to, h turi būti išmatuotas dideliu tikslumu. Barometrai vaidina svarbų vaidmenį nuspėjant orus: šilto (ir dažniausiai drėgno) oro ir šalto sauso oro masių tankiai yra skirtingi ir Žemės paviršiaus lygyje sukelia skirtingus atmosferos slėgius. Šie slėgio pokyčiai pasireiškia tam tikru atstumu anksčiau nei atslenka su jais susijusios oro masės.

I Paprastas vandens manometras yra sujungtas su dujų tiekimo sistema laboratorijoje ir rodo 120 mm skirtumą tarp vandens lygių atšakose. Koks yra papildomas dujų slėgis?

Pigesnis prietaisas atmosferos slėgiui matuoti yra barometras **aneroidas** (beskystis). Jame yra metalinė dėžutė, kurios dugnas ir viršus gofruoti. Oras dėžutėje praretintas, o jos formą palaiko



8.27 pav. **Paprastas gyvsidabrio barometras**



8.28 pav. **Aneroidinis barometras**



8.29 pav. **Altimetras**

stipri spyruoklė, neleidžianti dėžutei subliūkšti veikiant atmosferos slėgiui (8.28 pav.).

Atmosferos slėgio pokyčiai sukelia nedidelius dėžutės paviršiaus poslinkius. Šie poslinkiai yra mechaniškai ar elektroniškai sustiprinami, kad būtų galima stebėti. Aneroidinius barometrus reikia retkarčiais kalibruoti, jų parodymus sulyginant su labiau tiesioginių matavimų gyvsidabrio barometru rezultatais. Tas pats principas kaip aneroide yra naudojamas ir **altimetre** (8.29 pav.), kadangi slėgis priklauso nuo aukščio.

Žr. 16 ir 17 klausimus.

Hidraulika

Modernių industrinių mechanizmų pagrindą dažnai sudaro **hidrauliniai** įrenginiai. Lėktuvo sparnų paviršiai, automobilių stabdžiai bei įvairūs dideli ir galingi mechanizmai, naudojami gamyboje ir statybose, atlieka savo funkcijas todėl, kad skysčiai perduoda slėgį. Svarbiausia čia panaudojama savybė, kad, nors *slėgis* yra vienodas visame hidrauliniame skystyje, *jėga* (t. y. slėgio jėga), kurią tas slėgis sukelia tam tikrame paviršiuje, priklauso nuo to paviršiaus ploto. Tai reiškia, kad hidraulinė sistema gali veikti kaip *jėgą didinantis prietaisas* (8.30 pav.).

?

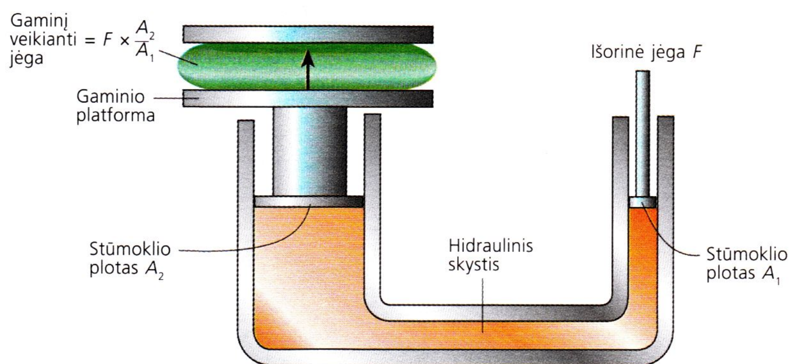
J Prieš pat pakylant lėktuvui jo pilotas turi patikrinti ir, jei reikia, nustatyti aneroidinį altimetrą. Nurodykite dvi priežastis, kodėl reikia tai padaryti.



8.30 pav. **Kairėje: ekskavatorius; cilindriniai strypai yra hidraulinės sistemos dalis. Dešinėje: hidrauliniai vamzdeliai lėktuve**



8.31 pav. **Hidraulinio preso veikimo principas**



Pagrindinės hidraulinio preso dalys yra pavaizduotos 8.31 pav. Hidrauliniu presu gaunama didelė spaudžianti jėga veikiant kur kas mažesne jėga.

Išorinė jėga F veikia plotą A_1 ir hidrauliniame skystyje (dažniausiai specialioje alyvoje) sukelia slėgį P, kurio dydis:

$$P = F/A_1$$

Šis slėgis perduodamas skystyje ir veikia kitą paviršių, kurio plotas A_2 yra daug didesnis nei plotas A_1. Todėl gaminį veikianti jėga:

$$\begin{aligned} \text{jėga} &= \text{slėgis} \times \text{plotas} \\ &= PA_2 \\ &= FA_2/A_1 \end{aligned}$$

Jei plotas A_2 100 kartų didesnis nei A_1, išorinė jėga sustiprinama tiek pat kartų, taigi padidėja 100 kartų.

Ar skysčiai nespūdūs?

Dažnai sakoma, kad hidraulika remiasi tuo, kad skysčiai yra „praktiškai nespūdūs“. Žinoma, palyginus su dujomis, juos suspausti sunku, nors kietuosius kūnus suspausti dar sunkiau. Tačiau kietieji kūnai turi savybę, veikiant didelėms jėgoms, šlyti, linkti ar subyrėti.

Šio trūkumo skysčiai neturi, todėl jie ir naudojami hidrauliniuose mechanizmuose. Tačiau skysčiai irgi turi trūkumų – jie garuoja, be to, juos reikia laikyti iš kietųjų medžiagų pagamintuose induose ar vamzdžiuose. Esant dideliam slėgiui, šie kietakūniai konteineriai gali įskilti ir skystis gali ištekėti.

Kodėl neskęsta laivai: Archimedo dėsnis

Kaip ir daugeliui žmonių, graikų mokslininkui ir matematikui Archimedui iš Sirakūzų (maždaug 287–212 pr. Kr.) viena geriausių minčių kilo vonioje, bent jau taip yra pasakojama. Tačiau nepriklausomai nuo to, kur ir kaip jam atėjo ta mintis, Archimedas buvo pirmasis mokslininkas, kuris suvokė tokio kasdieninio reiškinio, kad įlipus į vonią, vandens lygis joje pakyla, svarbą. Šį reiškinį jis susiejo su uždaviniu, kurį buvo gavęs išspręsti.

Kilo įtarimas, kad karaliaus karūna buvo pagaminta iš aukso ir sidabro lydinio, o ne iš gryno aukso, kuris buvo duotas karūną gaminusiam juvelyrui. Karūnos tankis Archimedui galėjo duoti atsakymą. Jis galėjo karūną pasverti, tačiau kaip nustatyti jos tūrį? Tada jis suvokė, kad karūnos tūris bus lygus jos išstumto vandens tūriui.

Archimedas taip pat atkreipė dėmesį į tai, kad kūnas plūduriuoja, jei jis tuščiaviduris arba jei jo tankis mažesnis nei vandens. Jis teigė, kad išstumtas vanduo veikia panardintą kūną aukštyn nukreipta jėga. Šios idėjos išsirutuliojo į **Archimedo dėsnį,** kuris dabar formuluojamas taip:

Visiškai ar iš dalies skystyje ar dujose panirusį kūną veikia aukštyn nukreipta jėga, lygi išstumto skysčio ar dujų svoriui.

Šis efektas atsiranda dėl skysčio ar dujų slėgio.

Panagrinėkime tašelį (paprastumo dėlei imame taisyklingos formos), esantį skystyje (8.32 pav.).

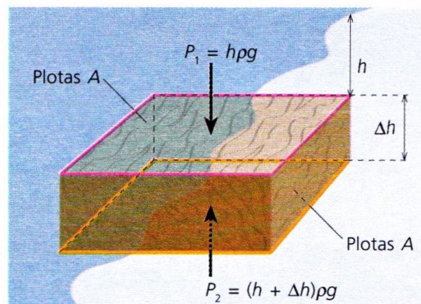
Jo viršutinį paviršių veikiantis slėgis P_1 yra lygus $h\rho g$, kur ρ – skysčio tankis. Šis slėgis veikia vertikalia kryptimi ir slegia paviršių žemyn jėga, lygia $Ah\rho g$.

Apatinį paviršių veikia slėgis $P_2 = (h + \Delta h)\rho g$, kuris yra nukreiptas į viršų ir sukelia jėgą $A(h + \Delta h)\rho g$. Šonines sieneles veikiančios jėgos kompensuojasi.

Taigi tašelį veikianti atstojamoji jėga yra nukreipta į viršų ir lygi $A\Delta h\rho g$. Čia $A\Delta h$ yra tašelio tūris (V), todėl keliančiosios jėgos išraiška supaprastėja į $V\rho g$, kas, akivaizdu, reiškia išstumto skysčio svorį.

Ar kūnas skęs, ar plūduriuos, priklauso nuo jo paties svorio W. Jei $W > V\rho g$, jis skęs. Jei tašelio tankis ρ_T, tai jo svoris bus lygus $V\rho_T g$, ir skendimo sąlygą galima užrašyti paprastai: $\rho_T > \rho$.

Jei ρ_T yra mažesnis už ρ, tai panardintą tašelį veikianti atstojamoji jėga bus nukreipta į viršų, ir jis kils tol, kol išstumto skysčio tūris bus tik toks, kad keliamoji jėga prilygtų tašelio svoriui.



8.32 pav. **Plaukiantį kūną veikiančios jėgos**

?

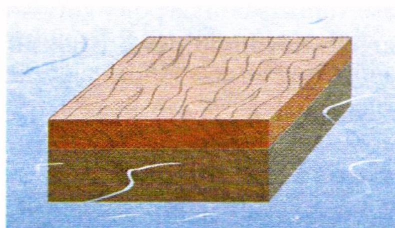
K Žemiau pateiktame pavyzdyje gauta, kad po vandeniu esanti tašelio dalis yra lygi 0,57. Medienos ir vandens tankių santykis irgi yra 0,57. Ar tai atsitiktinis sutapimas? Paaiškinkite.

L Laivai dažniausiai gaminami iš plieno, kurio tankis yra 7700 kg · m^{-3} – žymiai didesnis nei vandens. Kodėl laivai plaukia?

Žr. 13 klausimą.

PAVYZDYS

K Kedro medienos tašelio masė lygi 200 kg, o tankis 570 kg · m^{-3}. Kokia plūduriuojančio tašelio dalis bus panirusi į vandenį (tankis 1000 kg · m^{-3})?



A Tašeliui plūduriuojant jo išstumto vandens svoris bus lygus paties tašelio svoriui. Tai tolygu teiginiui, kad tašelio ir *išstumto* vandens masės yra lygios.

Išstumto vandens masė = 200 kg.

Išstumto vandens tūris = vandens masė/vandens tankis = 200/1000 = 0,20 m^3.

Tašelio tūris = tašelio masė/tašelio tankis = 200/570 = 0,351 m^3.

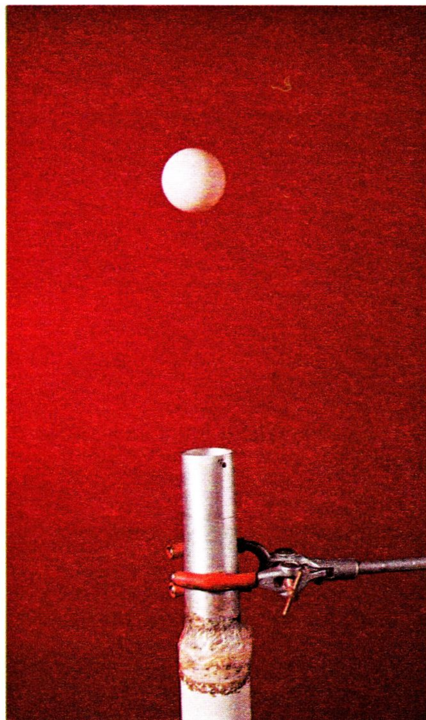
Taigi vandenyje panirusi tašelio dalis lygi

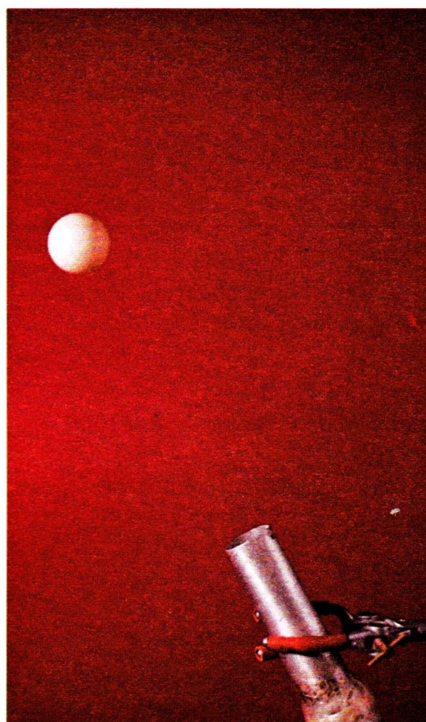
0,20/0,351 = 0,57.

8.33 pav.

Skysčių ir dujų tekėjimas

8.34a) pav. parodytas lengvas kamuoliukas, kybantis oro srovėje, besiveržiančioje iš dulkių siurblio išmetimo angos. Kamuoliuko svorį atsveria į viršų nukreipta jėga, atsirandanti, kai oro srovė atsimuša į kamuoliuko apatinę dalį ir keičia savo kryptį. Oro masės judesio kiekis keičiasi, ir dėl to atsiranda jėga.





8.34 pav. **Polistireno kamuoliukas: a) laikomas vertikalioje oro srovėje, pučiamoje iš dulkių siurblio žarnos galo; b) kampu nukreiptoje oro srovėje**

Ši jėga veikia oro srauto kryptimi. Jums gali kilti klausimas, kodėl kamuoliukas, sakytume, tvarkingai laikosi oro sraute ir nenupučiamas į šoną. Dabar žvilgtelėkite į 8.34b) pav.: jame parodytas tas pats kamuoliukas oro sraute, nukreiptame nuo vertikalės. Paprasčiausia jėga, atsirandanti dėl judesio kiekio pokyčio, neišlaikytų kamuoliuko kampu pakreiptame sraute, todėl akivaizdu, kad turi būti kita jėga (ar jėgos), kuri neleidžia kamuoliukui kristi.

Tai gana lengvas būdas pademonstruoti, kad dujoms ar skysčiams judant kieto kūno paviršiaus atžvilgiu pasireiškia netikėti reiškiniai. Jie svarbūs daugelyje praktinių situacijų, pradedant lėktuvo skrydžiu ir baigiant pulverizatoriais, taip pat konstruojant vėjo malūnus. Jiems veikiant beisbolo, teniso ar kroketo kamuoliukai gali skriedami pakeisti kryptį. Skysčių ir dujų srautų judėjimo principus daugiau kaip prieš du šimtus metų pirmasis paaiškino Danielis Bernulis (*Daniel Bernoulli*), nors vargu ar jis numatė *visas* savo teorijos išvadas.

Bernulio dėsnis

Įsivaizduokite skystį, tekantį vamzdžiu, kurio forma pavaizduota 8.35 pav. Srautas yra tolydus: kiek skysčio įteka pjūvyje X, tiek išteka pjūvyje Y. Kad taip atsitiktų, skystis siaurose vamzdžio vietose turi tekėti *greičiau* nei plačiose.

Jei skystis greičiu v teka vamzdžiu, kurio skerspjūvio plotas lygus A, tai per sekundę pratekėjęs tūris bus lygus Av. Jei skystis **nespūdus,** kintant A turi kisti ir v. Veikiant slėgiams, kurie yra įprasti praktikoje pasitaikančiose situacijose, skysčiai yra nespūdūs. Todėl nepastovaus skerspjūvio vamzdžiu tekančiam skysčiui dydis Av išlieka pastovus. Tai – **tolydumo dėsnis** skysčiams.

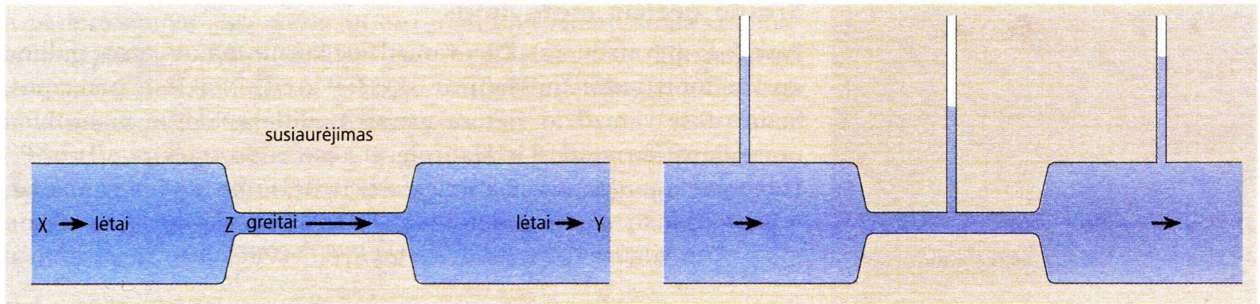
Dujas suspausti yra lengviau, todėl kintant slėgiui, kai vamzdis praplatėja ar susiaurėja, keičiasi ir dujų *tankis*. Išlikti pastovi turi dujų masė, kuri įteka ir išteka iš vamzdžio atkarpos. Patogu tai įsivaizduoti kaip pastovų molekulių skaičių, įtekantį ir ištekantį toje vamzdžio atkarpoje. Esant bet kokioms ploto A ir greičio v vertėms, dujų, kurių tankis ρ, masė vamzdžio atkarpoje, kurios ilgis v metrų, yra lygi ρAv. Šiuo atveju tolydumo dėsnį išreikšime bendresne forma:

$$\rho Av = \mathbf{const}$$

Slėgis judančiuose skysčiuose ar dujose

Skystis teka dėl to, kad tam tikroje vamzdžio vietoje yra, tarkim, siurblys, sukuriantis slėgį, kuris yra vienodas visose skysčio vietose. Dabar pagalvokite, kas turėtų vykti skerspjūvyje Z (8.35 pav.). Čia skystis juda su pagreičiu, kad išaugtų jo greitis. Kad atsirastų pagreitis, jo kryptimi turi veikti atstojamoji jėga. Todėl slėgis į kairę nuo Z turi būti didesnis nei dešinėje.

8.36 pav. pavaizduota, kaip susidaro slėgių skirtumas tokio vamzdžio modelyje. Vertikalūs vamzdeliai veikia kaip manometrai. Skysčio stulpelio aukščiai juose atspindi slėgį. Stulpeliai rodo, kad slėgis siaurojoje vamzdžio vietoje yra mažesnis nei prieš ją esančioje platesnėje; taip ir numato teorija. Slėgis vėl išauga antroje plačiojoje vamzdžio dalyje, nes čia skysčio tėkmė sulėtėja, todėl turi veikti jėga, suteikianti jam neigiamą pagreitį.



8.35 pav. **Per sekundę pratekėjusio skysčio tūris yra toks pat tiek plačiojoje, tiek ir siaurojoje vamzdžio dalyse. Taigi siaurojoje dalyje skystis turi tekėti greičiau**

8.36 pav. **Slėgio kitimas skysčiui tekant vamzdžiu su kintamu skerspjūvio plotu**

Energijos pokyčiai tekančiuose skysčiuose ar dujose

Bernulis pirmasis matematiškai aprašė energijos pokyčius, kurie vyksta skysčiui tekant vamzdžiu. Tai pateikta papildomos informacijos srityje 192 psl. Jis įrodė **Bernulio lygtį**, kuri sieja skysčio slėgį P, greitį v ir tankį ρ taške, esančiame aukštyje h virš pasirinkto atskaitos taško:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{const}$$

Apibūdinant žodžiais:

slėgis + masės vieneto kinetinė energija + masės vieneto gravitacinė potencinė energija

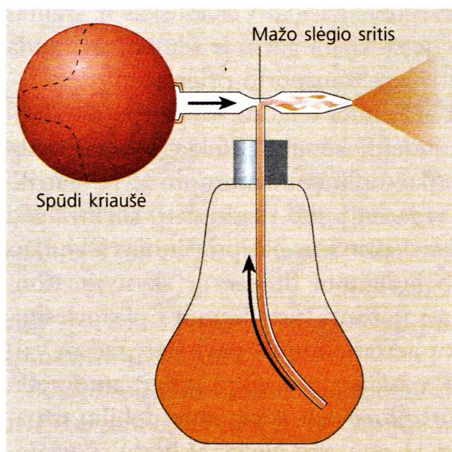
išlieka konstanta bet kurioje judančių dujų ar skysčio vietoje. Iš čia seka **Bernulio dėsnis.** Jis teigia, kad judančiame skystyje ar dujose galioja tokia priklausomybė:

Kuo didesnis greitis, tuo mažesnis slėgis.

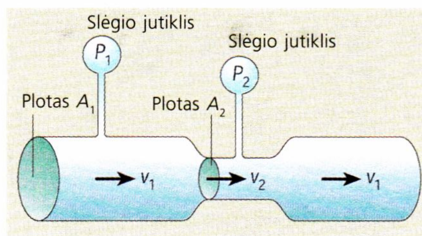
Bernulio dėsnio taikymai

Odekolono pulverizatorius

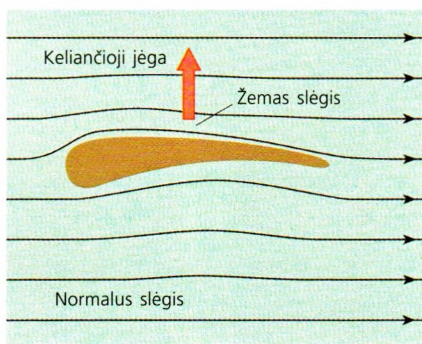
8.37 pav. pavaizduotas rankinis odekolono pulverizatorius. Paspaudus kriaušę, oras verčiamas tekėti vamzdeliu, kuriame yra susiaurėjimas, t. y. tam tikra to vamzdelio atkarpa yra siauresnė nei likusi dalis. Siaurąja dalimi oras juda greičiau, ir slėgis ten sumažėja. Todėl skystis vertikaliu vamzdeliu yra siurbiamas į viršų, patekęs į oro srovę išsiskaido į lašelius ir yra išpučiamas per pulverizatoriaus snapelį smulkios miglos pavidalu.



8.37 pav. **Odekolono pulverizatorius**



8.38 pav. **Pito vamzdžio veikimo principas**



8.39 pav. **Aerodinaminis paviršius su oro srauto linijomis**

?

M Ponia Frisby savo pyragus pardavinėdavo lėkštės formos plastikiniuose padėkluose. Jaunieji pirkėjai pastebėjo, kad besisukanti pyrago lėkštė (dabar kai kur vadinama tiesiog *Frisbee*) turi aerodinaminių savybių. Paaiškinkite: **a)** kodėl *Frisbee* skrieja; **b)** kodėl *Frisbee* skrydis lengviau valdomas, kai ji sukasi.



8.40 pav. **Automobilis aerodinaminiame vamzdyje ir srovės linijos, naudojant srauto indikatorius**

Srauto greičio matavimas

Paveiksle pavaizduotas Pito vamzdžio, kuriuo naudojantis galima apskaičiuoti judančių dujų ar skysčio greitį, veikimo principas. Siaurosiose vamzdžio vietose greitis padidėja. Slėgio matuokliai normalaus skersmens ir siauroje vietose rodo, tarkim, P_1 ir P_2. Potencinė energija čia nekinta, todėl iš Bernulio lygties gauname:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = \text{const},$$

iš kur
$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) \qquad [1]$$

Galioja ir tolydumo principas, todėl:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad [2]$$

Plotai yra žinomi, todėl išraišką

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

galime įrašyti į lygtį [1], o po to apskaičiuoti skysčio greitį pagrindiniame vamzdyje v_1, jei žinomos slėgių ir plotų vertės.

Aerodinaminiai paviršiai: skrydžio principas

Specialios formos lėktuvo sparnas (8.39 pav.) yra aerodinaminis paviršius. Viršutinė aerodinaminio paviršiaus dalis yra išgaubta, todėl skrydžio metu oras viršutinę dalį apteka didesniu greičiu nei apatinę. Taip atsitinka dėl to, kad oro srovė, aptekanti iš viršaus, per tą patį laiką turi nueiti didesnį kelią (kaip ir skysčiuose, oro srautas turi būti tolydus). Dėl to viršutinę dalį veikia mažesnis slėgis nei apatinę, ir aerodinaminį paviršių veikia aukštyn nukreipta jėga, kuri vadinama **keliamąja jėga.** Sparnas dažniausiai būna nukreiptas kampu judėjimo krypčiai, todėl jis slegia priekyje esantį orą. Tai sukelia papildomą jėgą (reakcijos), turinčią aukštyn nukreiptą dedamąją, veikiančią kartu su keliančiąja jėga. Dažniausiai kampas, kurį aerodinaminis paviršius sudaro su judėjimo į priekį kryptimi (atakos kampas), yra toks didelis, kad reakcijos jėga būtų efektyvesnė aukščio palaikymui nei Bernulio efektas, veikiantis aerodinaminį paviršių.

Srovės linijos ir turbulentinis tekėjimas

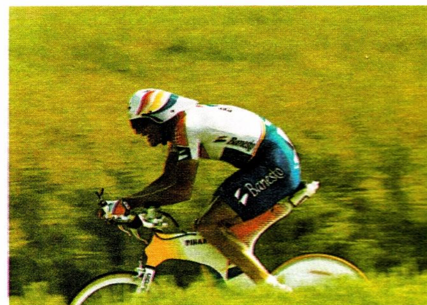
Paprastoje skysčių ir dujų tekėjimo teorijoje srautas laikomas stacionariu, t. y. dalelės jame juda glotniomis trajektorijomis, kaip 8.40 pav. vaizduoja srovės linijos, vizualizuotos srauto indikatoriaus. Tačiau viršijus tam tikrą greitį dalelių judėjimas pasidaro chaotiškas ir srautas tampa **turbulentiniu.** Dalis energijos virsta garsu ir šiluma; atsiranda papildomi slėgiai, veikiantys judančią transporto priemonę.

Turbulentinis srautas dažnai atsiranda ten, kur susiduria du srautai, skirtingais keliais aptekėję judantį kūną. Šį efektą galima pastebėti ore už automobilio, tiriamo aerodinaminiame vamzdyje. Sutrikdytas turbulentinis oro srautas sukuria žemo slėgio sritį, kuri traukia automobilį atgal, taip prisidėdama prie oro pasipriešinimo jėgų, kurios priešinasi bet kurio kūno judėjimui dujose ar skystyje. Konstruojant automobilį stengiamasi mažinti turbulentines pasipriešinimo jėgas. Geriausia forma būtų aerodinaminis paviršius, tačiau vairuotojams sukeltų rūpesčių, jei, pasiekus tam tikrą greitį, automobilis pradėtų skristi! Spoilerių tvirtinimas kai kurių automobilių užpakalinėje dalyje, kaip parodyta 8.41 pav., yra vienas iš būdų sumažin-

ti pasipriešinimo jėgą mažinant oro srauto turbulentiškumą automobilio užpakalyje. Kaip parodyta paveiksle, lenktynėse dalyvaujantys dviratininkai ir slidininkai greitojo nusileidimo rungtyje dėvi šalmus, mažinančius turbulentiškumo poveikį.

Skystyje ar dujose judantį paviršių veikia ir kitos pasipriešinimo jėgos. Pavyzdžiui, važiuojant automobiliui reikia atstumti orą, o tai sukelia reakcijos jėgą, kuri veikia automobilį. Dabar panagrinėsime trinties jėgas, veikiančias tarp automobilio paviršiaus ir oro.





8.41 pav. **Viršuje: Automobilis su užpakaliniu spoileriu. Apačioje: Specialus šalmas, kurį dviratininkai dėvi varžybų metu**

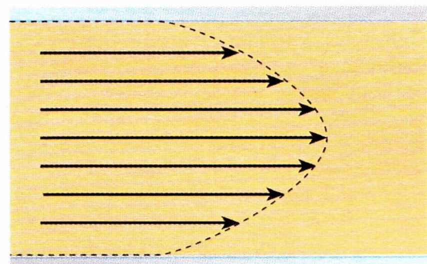
Trintis ir klampumas

Skysčių ar dujų sluoksniai lengvai juda vienas kito atžvilgiu, todėl skysčiai ar dujos negali pasipriešinti šlyties deformacijai (žr. 5 skyrių). Tačiau skysčiuose ir dujose pasireiškia tam tikra vidinė trintis, vadinama **klampa.** Ji skirtinga: peilio geležte rėžti per vandenį yra daug lengviau nei per medų. Klampumo jėgos analogiškai pasireiškia ir tuo atveju, kai vienas kito atžvilgiu juda gretimi skysčio sluoksniai.

Dujų ar skysčių tekėjimą vamzdžiu aprašant paprastu modeliu daroma prielaida, kad prie pat vamzdžio sienelės esantis sluoksnis iš viso nejuda, o greičiausia srovė yra vamzdžio centre (8.42 pav.). Skystyje ar dujose susidaro pastovus **greičio gradientas,** $\Delta v/\Delta x$, kur x – atstumas vamzdyje, išmatuotas spindulio kryptimi. Taip besielgiantis skystis vadinamas *Niutono skysčiu*. Nuo trinties tarp gretimų sluoksnių priklauso, kokiu greičiu skystis ar dujos gali tekėti – palyginkite tekantį vandenį ir sirupą. Skysčiai ir dujos apibūdinami **klampos koeficientu** η (graikiška raidė „eta“), nuo kurio priklauso klampumo jėgos dydis. Pasipriešinimą sukelianti klampumo jėga yra stipresnė storesniame vamzdyje. Šie aspektai atsispindi **Niutono klampos dėsnyje.** Jei F – klampumo jėga, priešinga tėkmei kryptimi veikianti dujų ar skysčio srautą, kurio skerspjūvio plotas A, tai

$$F = \eta A \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

Tokia pat jėga veikia ir vamzdžio sieneles.



8.42 pav. **Laminarusis tekėjimas veikiant klampumui. Greitis prie pat sienelių lygus nuliui ir didėja iki maksimalaus vamzdžio centre**

Klampos koeficiento matavimo vienetas yra $N \cdot s \cdot m^{-2}$, o jo vertės kai kuriems skysčiams ir dujoms pateiktos 8.3 lentelėje. (Kraujas yra klampesnis už vandenį!) Klampumas priklauso nuo temperatūros: paprastai didėjant temperatūrai klampos koeficientas mažėja, todėl šildomi skysčiai tampa takesniais.

■ Žr. 18 klausimą.

8.3 lentelė. **Kai kurių įprastinių skysčių ir dujų klampos koeficientai**

Skystis	Klampos koeficientas ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)
Vanduo (20°)	$1{,}0 \times 10^{-3}$
Vanduo (100°)	$0{,}3 \times 10^{-3}$
Kraujas (37,5°)	$2{,}7 \times 10^{-3}$
Variklio tepalas (20°)	830×10^{-3}
Glicerinas (20°)	850×10^{-3}
Oras (23°)	$0{,}018 \times 10^{-3}$

Stokso dėsnis

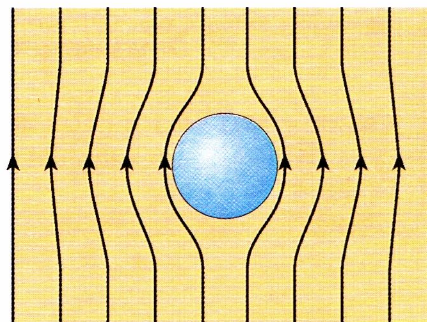
Klampumo jėgos taip pat veikia laminariai aptekamo kūno judėjimą skysčiuose ar dujose. Airių fizikas Džordžas Stoksas (*George Stokes*, 1819–1903) įrodė, kad, kai aptekantis srautas yra laminarus, skysčiu ar dujomis greičiu v judantis rutuliukas patiria pasipriešinimo jėgą

$$F = 6\pi\eta r v,$$

kur η – to skysčio ar dujų klampos koeficientas, r – rutuliuko spindulys (8.43 pav.).

Ši jėga susijusi su krintančio rutuliuko *ribiniu greičiu* (žr. 39 psl.). Šiuo atveju pasipriešinimo jėga dėl klampumo yra lygi rutuliuko svoriui:

$$mg = 6\pi\eta r v$$



8.43 pav. **Laminariškai aptekamo rutuliuko judėjimas skystyje ar dujose. Rodyklės parodo terpės greitį rutuliuko atžvilgiu**

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite ribinį greitį 2 mm spindulio **a)** švininiam rutuliukui, **b)** krušos gabaliukui.

(Švino tankis $1{,}14 \times 10^4$ kg · m^{-3}, o ledo tankis $9{,}2 \times 10^2$ kg · m^{-3}.)

A

a) Kaip buvo rašyta, ribinio greičio sąlyga yra $mg = 6\pi\mu r v$, iš kur ribinis greitis v:

$$v = mg / 6\pi\eta r$$

Švininio rutuliuko masė yra

$$m = \text{tūris} \times \text{tankis} = \frac{4}{3}\pi r^3 \times \rho,$$

todėl išraišką galime supaprastinti:

$$v = \frac{2}{9} r^2 \rho g / \mu$$

$$= (\frac{2}{9} \times 4 \times 10^{-6} \times 1{,}14 \times 10^4 \times 9{,}8)/(1{,}83 \times 10^{-5})$$

$$= 5{,}5 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b) Vienintelis skirtumas uždavinio sąlygoje yra medžiagų tankis. Todėl ribinių greičių santykis yra lygus tankių santykiui. Ledo tankis mažesnis nei švino, todėl jis kris lėčiau.

Krušos gabaliuko ribinis greitis lygus:

$$v = (5{,}5 \times 10^3 \times 9{,}2)/114 = 443 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Atkreipkite dėmesį, kad iš tikrųjų abu rutuliukai kris žymiai lėčiau, kadangi turbulentiškumas pasireikš esant ir žymiai mažesniems greičiams.

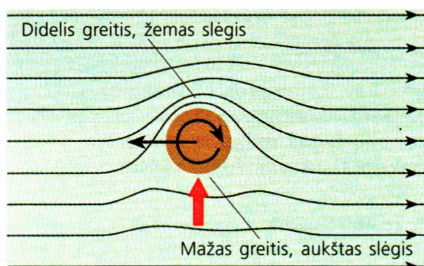


N Apskaičiuokite pavyzdyje aprašyto švininio rutuliuko ribinį greitį, kai jis krinta 20 °C temperatūros vandenyje.

O Parašiutininko masė 60 kg. Koks turi būti apvalaus parašiuto spindulys, kad ribinis greitis būtų lygus 4 m · s^{-1}? Tarkime, šiuo atveju galioja Stokso dėsnis.

Besisukantis kamuolys

8.43 pav. pavaizduotos srovės linijos atrodo kitaip, jei rutuliukas sukasi. Kai kuriuose žaidimuose su kamuoliais ar kamuoliukais, pavyzdžiui, krokete, futbole ar tenise, žaidėjas įsuka kamuolį, kad jis skriedamas *keistų judėjimo kryptį*. Kamuolio paviršių veikia pasipriešinimo jėga dėl klampumo. 8.44 pav. pavaizduota, kas gali atsitikti. Srautų skirtingose kamuolio pusėse santykiniai greičiai yra skirtingi, todėl skystis ar dujos kamuolį veikia didesniu slėgiu iš tos pusės, kur greitis mažesnis. Kamuolys nukrypsta į šoną ir apgauna mušėją beisbole, futbolo vartininką ar priimantį padavimą tenisininką.



8.44 pav. **Srovės linijos apie besisukantį kamuolį**

Pasipriešinimo efektai, veikiantys automobilį

Transporte energiją galima „taupyti" mažinant įvairius nuostolius. Mūsų laikais konstruojant automobilius atsižvelgiama į **pasipriešinimo koeficientą.** Šis koeficientas rodo, kokią dalį energijos judantis automobilis praranda dėl trinties į orą. Šie energijos nuostoliai atsiranda dėl to, kad automobilis atlieka darbą įveikdamas pasipriešinimo jėgą F_P. Jei v yra automobilio greitis, A – skerspjūvio plotas, o ρ – oro tankis, tai

$$F_P = \frac{1}{2} C A \rho v^2,$$

kur C yra pasipriešinimo koeficientas – konstanta, priklausanti nuo automobilio formos.

Žr. 19 klausimą.

Automobilį veikia dar ir *riedėjimo trintis* dėl padangų sąlyčio su kelio paviršiumi. Dėl to atsiranda jėga, lygi μN, kur N yra normalinė atramos reakcijos jėga, veikianti tarp automobilio ir kelio. Automobilio riedėjimo trinties koeficientas apytiksliai lygus 0,02. Normalinė reakcijos jėga didėjant greičiui šiek tiek sumažėja, nes automobilis elgiasi kaip aerodinaminis paviršius (laimė, važiuojant kelyje įmanomais greičiais, nelabai efektyviai!).

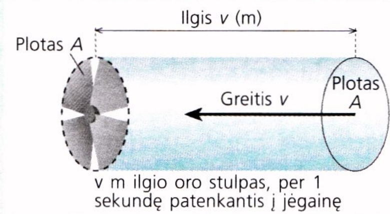
Riedėjimo trintis yra žymiai svarbesnė nei oro pasipriešinimo jėga, kai automobilis važiuoja nedideliu greičiu. Tačiau oro pasipriešinimo jėga yra proporcinga greičio kvadratui. Tipiškam automobiliui oro pasipriešinimo ir riedėjimo trinties jėgos susilygina esant

maždaug 18 m · s^{-1} greičiui, todėl galiausiai oro pasipriešinimas yra pagrindinė su trintimi susijusių nuostolių priežastis.

Energijos išgavimas iš judančių dujų ir skysčių

Vėjo energija sukėlė didelį susidomėjimą kaip atsinaujinantis energijos šaltinis. Anksčiau vėjo malūnai judančio oro energiją perduodavo tiesiogiai veikiantiems mechanizmams, dažniausiai miltus malančioms girnoms. Dabar vėjo malūnai naudojami didelėmis grupėmis **vėjo jėgainėse** ir suka elektros generatorius.

Energija, kurią galima išgauti iš judančio oro srauto, priklauso nuo judėjimo greičio ir jo tankio, t. y. nuo jo turimos kinetinės energijos. Panagrinėkime vėjo malūną su skritulio formos skerspjūviu. Tarkime, kad jo mentės dengia visą skerspjūvio plotą, kaip ir turbinos, pavaizduotos 8.45 pav.



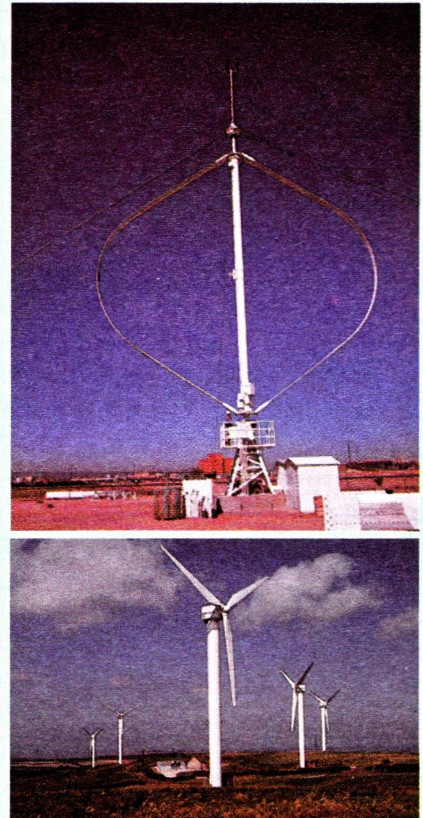
8.45 pav. Oro stulpas, sukantis malūno mentes

Oro vienetinio tūrio masė yra lygi ρ, kur ρ – oro tankis (1,3 kg · m^{-3}). Taigi vienetinio tūrio kinetinė energija $\frac{1}{2}\rho v^2$, kur v – oro greitis. Oro, pratekančio pro vėjo malūną per vieną sekundę, tūris lygus Av, kur A yra malūno sparnų aprėpiamas plotas. Taigi maksimali energija *per sekundę* (džaulis per sekundę = vatui), kurią galima išgauti vėjo malūne, lygi $Av \times \frac{1}{2}\rho v^2$, o maksimali išgaunama galia yra $P_{max} = 0{,}5A\rho v^3$.

Vėjo malūnas negali išgauti visos šios energijos. Tam reikėtų, kad būtų perduota visa į malūną krintančiame oro sraute esanti kinetinė energija. Tačiau net pagal teorinius skaičiavimus maksimali išgautos energijos dalis yra 60%. Praktikoje dar atsiranda kitų nuostolių, susijusių su menčių konstrukcija, trintimi perdavimo mechanizmuose ir generatoriaus efektyvumu, todėl išgaunamas galingumas praktiškai sumažėja iki maždaug 15% nuo P_{max}.

Atkreipkite dėmesį, kad vėjo galia proporcinga vėjo greičio *kubui*. Tai reiškia, kad vėjų, kurių greičiai didesni už vidutinę vertę, indėlis į išgautą energijos kiekį yra daug didesnis nei pusė tos energijos. Galutinis vėjo jėgainių efektyvumas priklauso nuo vėjo greičių pasiskirstymo per metus.

Yra dviejų tipų vėjo generatoriai: generatoriai su horizontalia ir su vertikalia ašimi (8.46 pav.).



8.46 pav. Vėjo generatorių tipai: viršuje – su vertikalia ašimi; apačioje – su horizontalia ašimi

PAVYZDYS

K Vėjo jėgainėje yra 100 vėjo generatorių. Kiekvieno iš jų menčių ilgis yra 50 m. Įvertinkite galią, kuri gali būti generuojama šioje jėgainėje tuo metu, kai vėjo greitis lygus 12 m · s^{-1}. Tarkime, vėjo generatorių efektyvumas yra 15%.

(Oro tankis = 1,3 kg · m^{-3}.)

A Efektyvusis vėjo generatoriaus plotas lygus

$$\pi r^2 = \pi \times 2500 = 7{,}85 \times 10^3 \text{ m}^2.$$

Bendras darbinis visų 100 vėjo jėgainės generatorių plotas = $7{,}85 \times 10^5$ m^2.

Taigi

$$P_{max} = (0{,}5 \times 7{,}85 \times 10^5) \times 1{,}3 \times (12)^3 = 880 \text{ MW}$$

Tikėtina galutinė šios galios dalis (15%) yra 130 MW.

Pagrindiniai iš automobilio variklio gaunamos energijos nuostoliai susiję visai ne su šiais efektais. Kaip paaiškinta 15 skyriuje, šiluminės mašinos yra neefektyvios, ir beveik 70% energijos, kuri išsiskiria degant kurui, yra prarandama. Be to, nuostoliai dar patiriami perdavimo mechanizmuose, todėl automobiliui varyti panaudojama tik apie 14% iš kuro išgaunamos energijos.

PAVYZDYS

K Kokia galia turi būti perduota automobilio ratams, kai jis važiuoja įprastiniu autostradoje greičiu, lygiu 31 m · s^{-1} (70 mylių per val.)? (Duomenys: esant tokiam greičiui, riedėjimo trintis sukelia 210 N jėgą; automobilio skerspjūvio plotas lygus 1,8 m^2; oro tankis lygus 1,3 kg · m^{-3}; pasipriešinimo koeficientas lygus 0,4.)

A Automobilį veikiančią pasipriešinimo jėgą apskaičiuojame taip:

$$F_p = \tfrac{1}{2}CA\rho v^2$$

$$= 0{,}5 \times 0{,}4 \times 1{,}8 \times 1{,}3 \times (31)^2$$

Pasipriešinimo jėga = 450 N

Taigi automobilį veikianti suminė jėga dėl trinties jėgų yra 210 N + 450 N = 660 N.

Ši jėga atlieka darbą. Jam atlikti iš automobilio variklio turi būti perduota energija.

Per sekundę atliktas darbas = jėga × per sekundę nueitas kelias (greitis), t. y.:

$$\frac{\text{reikalinga}}{\text{galia}} = \frac{\text{per sekundę}}{\text{atliktas darbas}} = \frac{\text{trinties}}{\text{jėga}} \times \text{greitis}$$

$$= 660 \text{ N} \times 31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= 19{,}8 \text{ kW}$$

Bernulio lygtis

Panagrinėkime nespūdų skystį, tekantį vamzdžiu. Vamzdžio skersmuo nepastovus – jo forma pavaizduota 8.47 pav. Skystis juda veikiamas slėgio, kurį sukelia išorinė sistema, pavyzdžiui, siurblys. Tarkime, skystis yra „idealus“, t. y. energijos nuostolių dėl klampumo jėgų jame nėra.

Padėtyje 1 cilindro pagrindą, kurio plotas A_1, veikia jėga F_1. Ši jėga atsiranda dėl slėgio, veikiančio paviršių A_1 iš kairės. Praėjus nedideliam laiko tarpsniui, paviršius pasistūmė į padėtį 2, ir tam tikro tūrio skysčio elementas nutekėjo iš 1 į 2. Kitoje vamzdžio dalyje pratekėjo *toks pat* skysčio tūris, kadangi skystis yra nespūdus. Tai parodyta padėtyse 3 ir 4. Čia vamzdis platesnis ir yra didesniame aukštyje. Atkreipkite dėmesį, kad antrasis srauto elementas juda prieš slėgio jėgą F_2, atsirandančią dėl skysčio, esančio dešinėje. Dabar panagrinėkime šių jėgų atliktą darbą ir judančio skysčio energijos pokyčius.

Jėgų atliktas darbas yra lygus:

$$W = F_1\Delta x_1 - F_2\Delta x_2$$

Neigiamas ženklas atsirado dėl to, kad F_2 veikia priešinga kryptimi nei F_1. Jėgos susijusios su slėgiais, todėl $F_1 = P_1A_1$ ir $F_2 = P_2A_2$, kur P_1 ir P_2 yra slėgiai, veikiantys atitinkamai paviršius A_1 ir A_2.

Todėl turime:

$$W = P_1A_1\Delta x_1 - P_2A_2\Delta x_2$$

arba, jei ΔV yra kiekvieno iš šių cilindrinių skysčio elementų tūris, tai:

$$W = (P_1 - P_2)\Delta V$$

Kaipgi laikui bėgant kis energija? Kai žemutinysis cilindras iš padėties 1–2 pagaliau pateks į viršutinę padėtį 3–4, jo kinetinė energija pasikeis nuo $\frac{1}{2}\Delta m v_1^2$ į $\frac{1}{2}\Delta m v_2^2$. Jo potencinė gravitacinė energija pakis dydžiu $\Delta mg(h_2 - h_1)$. Čia Δm yra tūrio elemento ΔV masė.

Dabar pasiremsime įžūlia idėja. Mes ignoruosime viską, kas nutiko skysčiui, kol jis tekėjo tarp dviejų mūsų pasirinktų padėčių: darbai, atlikti atskiruose intervaluose, kompensuojasi – taip pat, kaip ir energijos pokyčiai. Svarbus tik „atvirų galų“ įnašas, todėl **suminis atliktas darbas** yra paprasčiausiai lygus jau apskaičiuotam anksčiau. Būtent šis darbas ir sukelia energijos pokyčius. Taigi suminis darbas lygus:

$$(P_1 - P_2)\Delta V = \frac{1}{2}\Delta m(v_2^2 - v_1^2) + \Delta mg(h_2 - h_1)$$

Tačiau $\Delta m = r\Delta V$, kur r yra skysčio tankis. Todėl ankstesnę lygtį galime supaprastinti:

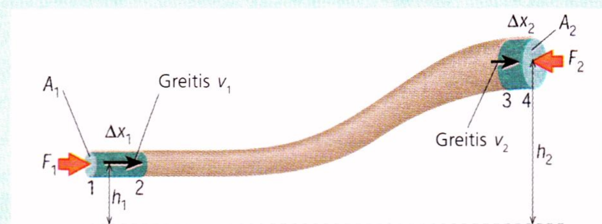
$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}r(v_2^2 - v_1^2) + rg(h_2 - h_1)$$

Ją galima tvarkingai sugrupuoti:

$$P_1 + \frac{1}{2}rv_1^2 + rgh_1 = P_2 + \frac{1}{2}rv_2^2 + rgh_2$$

Tai – Bernulio lygtis. Žodžiais ją galime nusakyti taip: taškuose išilgai srovės linijos judančiame neklampiame ir nespūdžiame skystyje

Slėgis + tūrio vieneto kinetinė energija + tūrio vieneto gravitacinė potencinė energija = konstanta visuose taškuose



8.47 pav. Nespūdus skystis, tekantis kintančio storio vamzdžiu

?

P Į Bernulio lygtį įrašykite $v_1 = v_2 = 0$. Pakomentuokite rezultatą.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėtumėte:

- Geriau suprasti Niutono judėjimo dėsnius, kai jie taikomi transporto ir judančių dujų bei skysčių aprašymui.
- Suprasti trinties vaidmenį transporte, gebėti taikyti rimties ir slydimo trinties dėsnius bei trinties koeficiento sąvoką.
- Suprasti klampumo, laminaraus tekėjimo ir pasipriešinimo koeficiento sąvokas, susieti jas su Stokso dėsniu ir ribiniu greičiu.
- Suprasti kūnų sukamojo judėjimo fiziką ir sugebėti naudotis kampinio greičio, kampinio pagreičio, sukamojo momento, judesio kiekio momento, inercijos momento bei sukamojo judėjimo kinetinės energijos sąvokomis.
- Gebėti taikyti judesio kiekio ir energijos tvermės dėsnius aprašant tamprius ir netamprius smūgius.
- Gebėti naudotis sąryšiu: jėgos impulsas = judesio kiekio pokytis ($F\Delta t = \Delta P$).
- Suprasti ir gebėti taikyti slėgio skysčiuose ir dujose sąvoką bei panaudoti ją tokiose praktinėse situacijose kaip hidraulika ir plūdrumas.
- Suprasti ir sugebėti taikyti Archimedo dėsnį.
- Suprasti Bernulio dėsnį ir kaip skysčių ar dujų slėgis, potencinė bei kinetinė energijos susietos Bernulio lygtyje.

KLAUSIMAI

1 Dviejų tuo pačiu keliu važiuojančių automobilių kinetinės energijos yra lygios. Ar tai reiškia, kad ir jų judesio kiekiai yra lygūs? Pagrįskite atsakymą.

2 Ledo ritulininkai ir dailiojo čiuožimo šokėjai pasinaudoja labai maža trintimi tarp pačiūžų ir ledo. Ar šios sporto rūšys būtų įmanomos, jei tarp sportininkų ir ledo visiškai nebūtų trinties? Paaiškinkite savo atsakymą.

3 2200 kg masės automobilis nejuda. Trinties tarp jo padangų ir kelio koeficientas lygus 0,7. Vairuotojas nori pradėti važiuoti didžiausiu įmanomu pagreičiu.

a) Kokia maksimali trinties jėga gali veikti automobilį?

b) Pavaizduokite automobilį ir pažymėkite dvi pagrindines jėgas, *veikiančias automobilį*, kai jis pradeda greitėti.

c) Apskaičiuokite automobilio pagreitį.

d) Remdamiesi atsakymu į klausimo dalį **c)** įvertinkite, per kiek laiko automobilis pasieks 30 m · s^{-1} greitį.

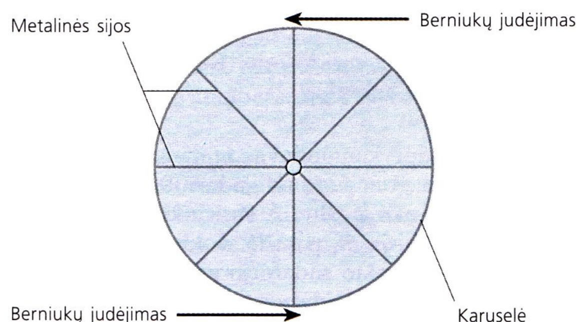
e) Praktikoje jūsų atsakymas į klausimą **d)** pasirodytų pernelyg optimistiškas: automobiliui prireiktų daugiau laiko šiam greičiui pasiekti. Kodėl?

4 Pagal *Automagistralių kodeksą* 13,6 m · s^{-1} greičiu judantis automobilis normaliai stabdant turėtų sustoti nuvažiavęs 14 m.

a) Koks turi būti trinties tarp padangų ir kelio koeficientas, kad taip atsitiktų?

b) Kokiu atstumu sustotų automobilis, jei dėl apledėjimo trinties koeficientas sumažėtų iki 0,2?

5 Judesio kiekį sukamajame judėjime apibūdiname *judesio kiekio momentu*. Panagrinėję m masės dalelę, greičiu v judančią apskritimu, kurio spindulys r, įrodykite, kad šis terminas turi fizikinę prasmę.



8.K5 pav.

Du berniukai, kurių kiekvieno masė lygi 50 kg, pavojingai žaidžia su žaidimų aikštelėje esančia karusele, kurios masė 100 kg, o skersmuo 4,0 m. Jie 6,0 m · s^{-1} greičiu bėga priešingomis kryptimis statmenai karuselės diametrui priešinguose jo galuose ir tuo pat metu užšoka ant karuselės (žr. 8.K5 pav.). Iš pradžių karuselė nejudėjo. Tarkime, kad karuselė – tai diskas, o vaikai – taškiniai kūnai.

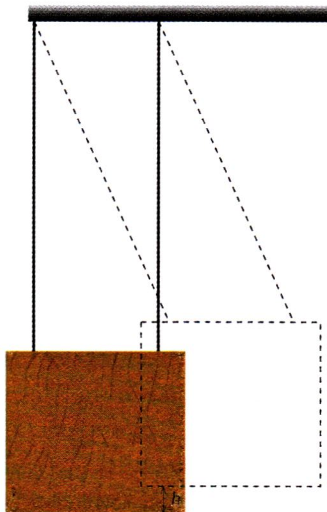
a) Raskite pradinį kampinį greitį po to, kai vaikai užšoko ant karuselės.

b) Vaikai spindulio kryptimi pereina į centrą. Koks bus naujas karuselės kampinis greitis?

c) Kiek kartų išauga karuselės kinetinė energija vaikams perėjus į centrą? Išsamiai paaiškinkite, iš kur atsiranda ši papildoma energija.

6 Paaiškinkite skirtumą tarp *tamprių* ir *netamprių* smūgių ir pateikite abiejų rūšių pavyzdžių.

7 Vienas iš būdų matuoti kulkos, iššautos iš bandomojo ginklo, greičiui yra paremtas balistinės švytuoklės panaudojimu. Tai paprasčiausiai didelis medinis tašelis, pakabintas ant ilgų virvučių (8.K7 pav.).



8.K7 pav.

a) 8,0 g kulka yra iššaunama į tašelį, kurio masė 6,0 kg. Tašelis su įstrigusia kulka juda 0,50 m · s^{-1} greičiu. Koks kulkos greitis prieš susidūrimą?

b) Praktikoje ginklų bandytojai medinio tašelio greičio tiesiogiai nematuoja, o matuoja maksimalų aukštį h, į kurį tašelis pakyla po smūgio. Kaip iš šio matavimo jie nustato pradinį tašelio greitį?

8 Važiuojantis automobilis atsitrenkia į kelkraštyje stovinčią autocisterną, kurios stabdžiai neįjungti. Paaiškinkite, kodėl po susidūrimo judančių automobilių kinetinė energija yra mažesnė nei automobilio kinetinė energija iki susidūrimo. Kas atsitiko su dingusia kinetine energija?

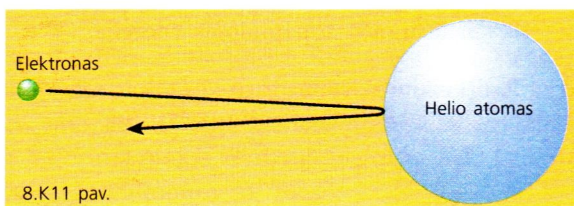
9 Žaislinis superkamuoliukas metamas ant kietų grindų ir atšoka greičiu, kuris sudaro 90% greičio, kuriuo jis atsitrenkė į grindis. Pasirinkite, kuri iš pateiktų verčių teisingai parodo, kokią dalį nuo pradinio judesio kiekio sudaro jo pokytis smūgio metu, ir paaiškinkite, kodėl pasirinkote: **a)** 10%, **b)** 90%, **c)** 190%.

10 Nepriklausomai nuo atsakymo į 9-ąjį klausimą, turėtumėte įrodyti, kad kamuoliuko kinetinės energijos pokytis yra maždaug 20%. Tai ir padarykite paaiškindami savo veiksmus.

11 Elektrono susidūrimas su helio atomu pavaizduotas 8.K11 pav. Smūgis idealiai tamprus.
Helio atomo masė maždaug 7000 kartų didesnė už elektrono. Patikrinkite ir pakomentuokite šiuos teisingus teiginius apie susidūrimo pasekmes:

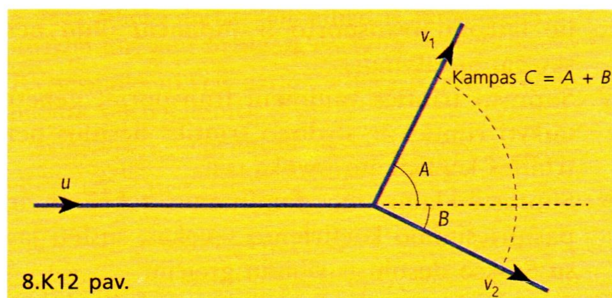
a) Helio atomas įgys dukart didesnį judesio kiekį nei prieš smūgį turėjo elektronas

b) Helio atomui atiteks maždaug 0,1% elektrono kinetinės energijos.



8.K11 pav.

12 8.K12 pav. apibendrintai pavaizduotas susidūrimas, vykstantis plokštumoje tarp dviejų dalelių, kurių masės yra lygios.



8.K12 pav.

Tiek judesio kiekis, tiek ir energija išsilaiko. Šios analizės tikslas yra įrodyti, kad, jei dalelių masės yra lygios, tai kampas C yra visada status, nepriklausomai nuo to, kokie bus kampai A ir B. Tam užrašome tris lygtis, vieną kinetinei energijai ir dvi judesio kiekiui, ir spręsdami šią lygčių sistemą eliminuojame greičius. Gautas trigonometrinis sąryšis, siejantis kampus A, B ir C, turi parodyti, kad C yra statusis kampas.

a) Užrašykite lygtį, siejančią kinetines energijas prieš ir po smūgio (1 lygtis).

b) Judesio kiekis – vektorinis dydis. Užrašykite sąryšius, siejančius mases ir greičius, **(i)** krintančios dalelės judėjimo kryptimi (2 lygtis) ir **(ii)** statmena jai kryptimi, kuria judesio kiekis prieš smūgį lygus nuliui (3 lygtis).

c) 1 žingsnis: Pakėlę lygtį (2) kvadratu ir prilyginę jos dešiniąją pusę lygties (1) dešiniajai pusei, eliminuokite iš sistemos u. Gautą rezultatą pažymėkite lygtimi (4).

d) 2 žingsnis: Lygtį (3) galima užrašyti tokiu pavidalu: v_1 = ... Eliminuokite v_1 iš lygties (4) įstatydami jo išraišką per v_2. Gauta lygtis bus ilga sinusų ir kosinusų virtinė, tačiau stebuklingu būdu v_2^2 yra kiekviename dėmenyje, ir jį galima suprastinti! Gautą lygtį pažymėkite (5).

e) Supaprastinkite lygtį (5). Paranku abi lygties puses padauginti iš vardiklio ir surinkti panašius narius. Pritaikykite trigonometrines formules (pvz., $\cos^2 A + \sin^2 A = 1$).

f) Turėtumėte gauti tokio pavidalo išraišką:
$\sin A \sin B - \cos A \cos B = 0$
Įsitikinkite, kad ji teisinga tik tada, kai $A + B = 90°$.

13 Prekybinio laivo dydis dažniausiai apibūdinamas jo *keliamąja galia*. Pavyzdžiui, kai sakoma, kad pilnai pakrauto laivo keliamoji galia yra 15 000 tonų, tai reiškia, kad pagal instrukcijas maksimaliai pakrovus šį laivą, jis išstums tokią vandens masę. Gėlo vandens tankis yra 1000 kg · m^{-3}, o vandens Šiauriniame Atlante – 1024 kg · m^{-3}.

a) Ar plaukdamas Šiauriniame Atlante ir Temzės upe šis laivas išstums tą pačią vandens masę?

b) Kuriuo atveju laivas nugrims giliau?

14 Povandeninis laivas paniręs į 800 metrų gylį jūros vandenyje, kurio tankis 1030 kg · m^{-3}. Koks yra slėgių laivo išorėje ir viduje skirtumas, jei laive palaikomas normalus atmosferos slėgis?

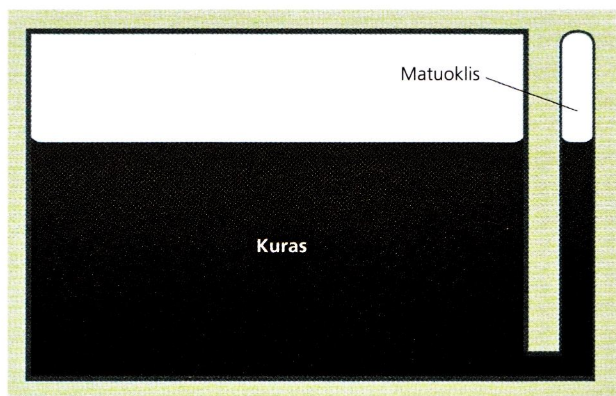
15 Kuro cisterna yra 2 m ilgio, 1,5 m pločio ir 1,8 m aukščio. Ji pripildyta naftos, kurios tankis 850 kg · m^{-3}.

a) Koks slėgis cisternos dugne?

b) Kokia jėga veikia cisternos dugną?

c) Kokia jėga veikia didžiausią cisternos šoninę sieną?

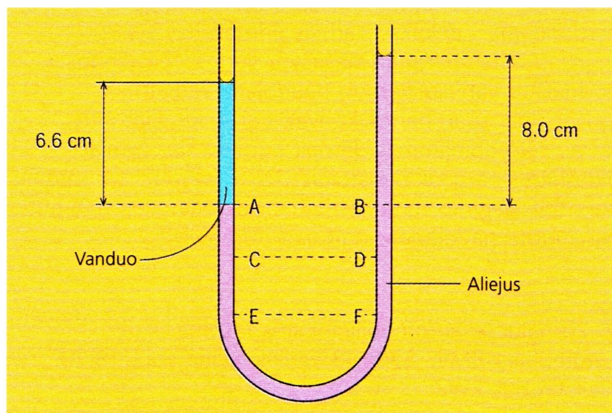
16 Greta kuro bako dažnai įmontuojami matuokliai, rodantys, kiek kuro yra bake (8.K16 pav.)



8.K16 pav.

Paaiškinkite, kodėl slėgis matuoklio dugne toks pat kaip ir bako dugne.

17 Dviejų nesimaišančių skysčių (pvz., aliejaus ir vandens) tankius lengva palyginti naudojant manometrą. Aliejų ir vandenį įpylus į U formos vamzdelį nusistovi pusiausvyra (8.K17 pav.). U formos vamzdelio skerspjūvis visur vienodas.



8.K17 pav.

a) Ką galite pasakyti apie slėgius taškuose A ir B? (Tai turėtų galioti ir taškuose C, D, E ir F.)

b) Vandens tankis lygus 1000 kg · m^{-3}. Pasinaudoję paveiksle pateiktais duomenimis apskaičiuokite aliejaus tankį.

18

a)
(i) Užrašykite Niutono klampumo dėsnį ir paaiškinkite į jį įeinančių dydžių fizikines prasmes.
(ii) Parodykite, kaip iš Niutono klampumo dėsnio galima išvesti klampos koeficiento matavimo vienetus.

b) 10 cm skersmens plieno plokštė, kurios paviršiai yra lygūs, guli viena iš plokščiųjų pusių ant lygaus horizontalaus paviršiaus. Kai besiliečiantys paviršiai yra švarūs ir sausi, patempti plokšteles šiuo paviršiumi reikia 5,0 N horizontalios jėgos. Tačiau jei paviršius išteptas alyva, tai pastoviai veikiant horizontaliai 0,50 N jėgai plokštelė pasiekia 7,5 cm · s^{-1} ribinį greitį. Alyvos sluoksnis tarp plokštumos ir plokštelės yra 0,1 mm storio.
(i) Kodėl alyvos plėvelė sumažina jėgą, kurios reikia plokštelei patempti?
(ii) Paaiškinkite, kodėl plokštelė pasiekia ribinį greitį.
(iii) Raskite darbą, kuris atliekamas per vieną sekundę, plokštelę ribiniu greičiu tempiant alyvuotu paviršiumi. Į kokią formą pereina energija atliekant šį darbą?
(iv) Nustatykite alyvos klampos koeficientą ir nurodykite, kokias padarėte prielaidas.

c) Paaiškinkite kaip pasikeistų alyvos, kuri čia veikia kaip tepalas, efektyvumas, jei:
(i) jos klampa būtų didesnė,
(ii) pakiltų temperatūra.

19

a) Judančio automobilio pasipriešinimo jėga aprašoma formule $F = 0{,}5C_p A\rho v^2$.
(i) Paaiškinkite į šią lygtį įeinančių dydžių fizikinę prasmę.
(ii) Aprašykite eksperimentą, kuris galėtų patvirtinti šį sąryšį tarp F ir v.

b) Tam tikro automobilio $A = 3{,}0$ m^2, o $C_p = 0{,}35$.
(i) Apskaičiuokite, kokia pasipriešinimo jėga veikia šį automobilį, kai jis važiuoja 144 km · h^{-1} greičiu, jei oro tankis lygus 1,2 kg · m^{-3}.
(ii) Apskaičiuokite, kokią galią turi išvystyti automobilis, kad nugalėtų pasipriešinimo jėgą, veikiančią važiuojant 144 km · h^{-1} greičiu.
(iii) Gamintojo nurodoma šio automobilio variklio galia yra lygi 55 kW. Paaiškinkite, kodėl ši vertė skiriasi nuo gautos atsakant į klausimą **b) (ii)**.

Užduotis

ENERGIJA IR AUTOMOBILIAI

Automobilio variklio galia yra nusakoma kilovatais. Ji matuojama ir „arklio jėgomis". Šis vienetas yra reliktas iš tų laikų, kai naujai pasirodžiusių garo variklių gamintojai stengėsi padaryti įspūdį savo potencialiems pirkėjams lygindami savo variklius su tuo metu dar plačiai naudojamomis, bet jau atgyvenusiomis arklių jėgą naudojančiomis mašinomis.

Tipiško nedidelio automobilio variklio galia yra maždaug 70 arklio jėgų (AJ). Tai ekvivalentu maždaug 53 kW, kadangi 1 AJ = 0,746 kW. Ši vertė, žinoma, parodo maksimalią galią, kurią gali išvystyti variklis, tarkim, nevėjuotą dieną maksimaliu greičiu judėdamas lygiu keliu. Natūraliai kyla klausimas:

Nuo ko gi priklauso automobilio maksimalus greitis?

8.U1 lentelė. **Važiuojantį automobilį veikiančios jėgos ir galia, reikalinga, kad automobilis išvystytų tam tikrą greitį**

Greitis ($m \cdot s^{-1}$)	Riedėjimo trinties jėga (N)	Oro pasipriešinimo jėga (N)	Suminė pasipriešinimo jėga (N)	Galia (kW)
9,0	228	52	280	2,5
18	223	206	449	8,1
27	219	470	689	18,6
36	212	834	1046	37,7
45	204	1300	1504	67,7

Oro tankis lygus 1,29 kg · m^{-3}.

8.U1 lentelėje pateikta galia, kurią turi išvystyti tipiškas automobilis, kad horizontaliame kelyje pasiektų tam tikrą pastovų greitį (žr. 190 psl.). Dirbant varikliui, ratus veikia jėgos, kurios atlieka darbą įveikdamos pasipriešinimo jėgas. Dvi svarbiausios pasipriešinimo jėgos – tai **oro pasipriešinimo** ir **riedėjimo trinties** jėgos.

Oro pasipriešinimo jėga *R*
Automobilio priekis turi atstumti orą į šalis ir „slysti" pro jį. Dėl to oras įgyja kinetinės energijos bei veikia automobilio paviršių trinties jėga. Be to, atsiranda žymūs energijos nuostoliai, kai oro srovei atitrūkus nuo automobilio užpakalinės dalies, ji tampa **turbulentine** (žr. 188 psl.).

Riedėjimo trinties jėga *F*
Energijos nuostoliai, atsirandantys padangai riedant keliu, irgi turi keletą priežasčių. Riedėjimo trintį nulemia kelio paviršiaus nelygumai, kurie iš dalies atsiranda dėl to, kad automobilis savo svoriu deformuoja kelio paviršių. Pati padanga irgi deformuojasi, ir dėl taip atsirandančios „vidinės trinties" padanga kaista. Darbo, atliekamo įveikiant pasipriešinimo jėgas, atlikimo sparta turi būti lygi efektyviajai automobilio galiai. Penktojo lentelės stulpelio vertės apskaičiuotos remiantis apibrėžimu

darbas = jėga × kelias

ir sąryšiu

galia = darbo atlikimo sparta (N · m · s^{-1} arba J · s^{-1}), t. y.:

$P = W/t = Fd/t = Fv$

Reiškia, maksimalus greitis priklauso nuo didžiausios galios, kurią gali išvystyti automobilis, ir pasipriešinimo jėgos, veikiančios automobilį jam važiuojant tuo greičiu.

Pasipriešinimo jėgos
Iš lentelėje pateiktų duomenų akivaizdžiai matyti, kad didėjant greičiui ima viršų energijos nuostoliai dėl oro pasipriešinimo. Nuostoliai dėl riedėjimo trinties beveik nekinta (jie netgi šiek tiek mažėja, didėjant greičiui). Oro pasipriešinimo poveikis priklauso ne tik nuo greičio, bet ir nuo automobilio dydžio ir formos, ypač nuo jo skerspjūvio ploto. Tai dažniausiai galima aprašyti formule

$$R = \frac{1}{2} CA\rho v^2,$$

kur R – oro pasipriešinimo jėga, veikianti greičiu v važiuojantį automobilį, A – skerspjūvio plotas, ρ – oro tankis, o C – **pasipriešinimo koeficientas,** priklausantis nuo automobilio formos. Aptakaus sportinio automobilio pasipriešinimo koeficientas yra maždaug 0,3, o kombi tipo automobilio – 0,45.

Todėl galime užrašyti, kad automobilį veikianti suminė pasipriešinimo jėga

$$F_{at} = F + R = \text{const} + \frac{1}{2} CA\rho v^2$$

Bendras efektyvumas
Čia neatsižvelgsime į kitus energijos nuostolius, atsirandančius veikiant radiatoriaus ventiliatoriui, įjungus šviesas, šildymą, radiją ar kondicionierių. Naudinga energija gaunama variklyje degant kurui, o didžiausi nuostoliai atsiranda perduodant šią energiją.

Degimo metu kaista variklio dalys ir šiluma perduodama į aplinką. Kad šis perdavimas vyktų sparčiau ir temperatūra neviršytų vertės, reikalingos normaliam variklio darbui, naudojami radiatorius (priverstinai spartinantis konvekciją) ir ventiliatorius. Tačiau termodinamikos dėsniai numato dar žymiai didesnius energijos nuostolius (žr. 15 skyrių). Tik mažiau nei 15% degimo metu išsiskiriančios energijos gali būti panaudota naudingam darbui automobilyje.

1 Žurnaluose automobilininkams rašoma, kad automobilio BMW 530i V8 variklio galia yra 218 AJ. Kiek tai bus kW?

2
a) Kuo skiriasi laminarusis ir turbulentinis dujų ar skysčių tekėjimas?
b) Kodėl dėl turbulentiškumo prarandama energija?

3 Atidarius automobilio langus, kuro suvartojama 3 procentais daugiau.

a) Paaiškinkite kodėl taip atsitinka.

b) Įjungus kondicionierių, kelias, kurį automobilis nuvažiuoja suvartodamas 1 litrą kuro, sumažėja apie 12%. Nurodykite, kokie būtų privalumai ir trūkumai, jei karštą dieną nesinaudotume oro kondicionieriumi, bet atsidarytume langą.

4

a) Naudodamiesi 8.U1 lentelėje pateiktais duomenimis grafiškai atvaizduokite:
(i) oro pasipriešinimo jėgos priklausomybę nuo greičio,
(ii) automobilio vartojamos galios priklausomybę nuo greičio.
Pakomentuokite šių grafikų panašumus ir skirtumus.

b) Naudodamiesi šiais grafikais ar kitu būdu įvertinkite, kokios galios prireiktų tokiems greičiams pasiekti:
(i) 20 m $\cdot$ s^{-1},
(ii) 50 m $\cdot$ s^{-1}.

5

a) Nurodykite dvi priežastis, kodėl autocisternai reikalingas žymiai galingesnis variklis nei vidutinio dydžio automobiliui.

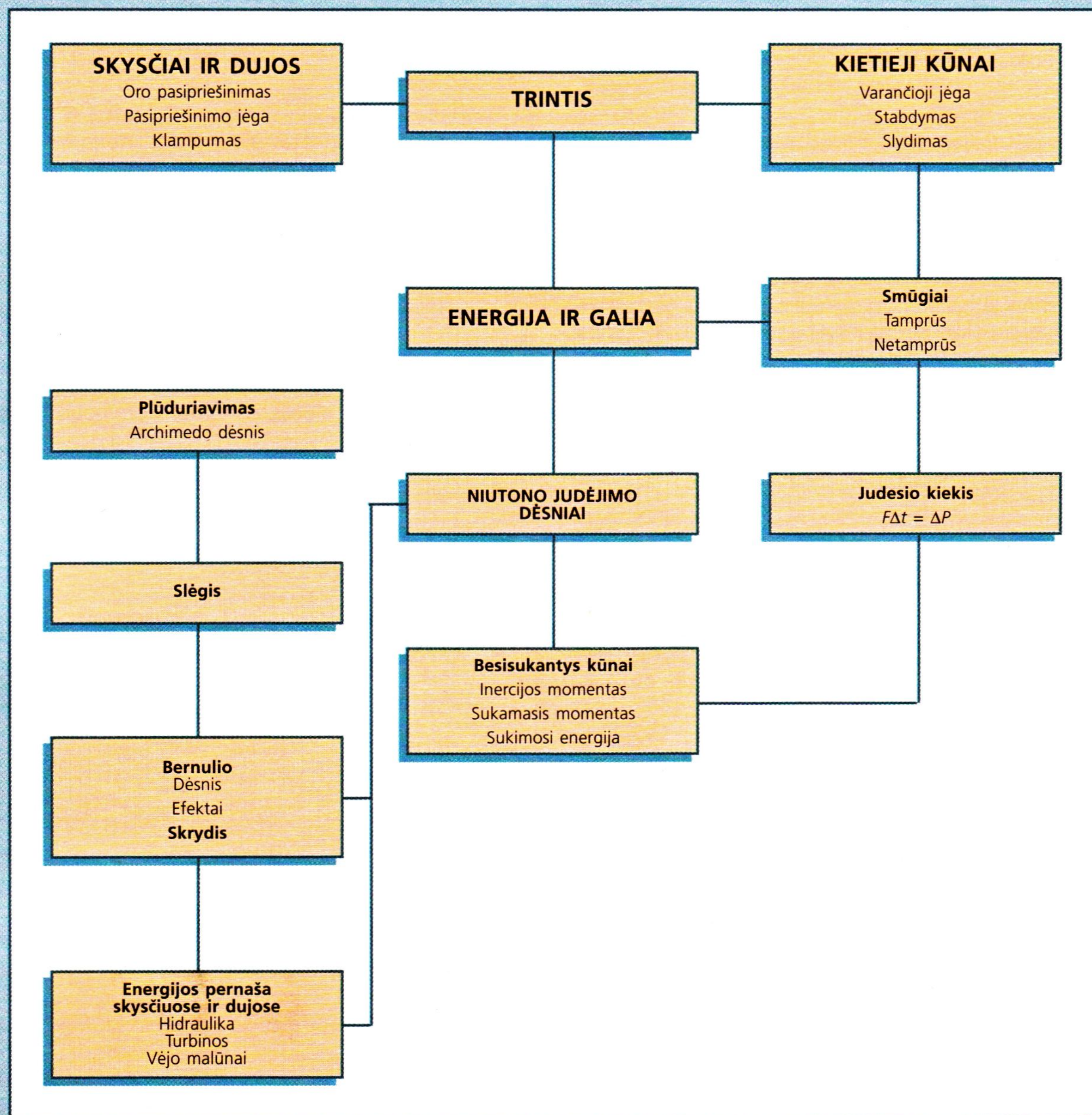
b) Nedidelis automobilis su 1 litru kuro nuvažiuoja maždaug 14 km, o didelis kombi tipo automobilis – tik 6 km. Kokia pagrindinė šio skirtumo priežastis?

6 Sportinio automobilio skerspjūvio plotas 2,0 m^2, o pasipriešinimo koeficientas 0,32. Įvertinkite jo maksimalų greitį, jei variklio galia yra lygi 90 kW. Įvertinkite, kokį maksimalų greitį pasiektų *Land Rover* tipo automobilis su tokiu pačiu varikliu, jei jo skerspjūvio plotas 3 m^2, o pasipriešinimo koeficientas 0,48.

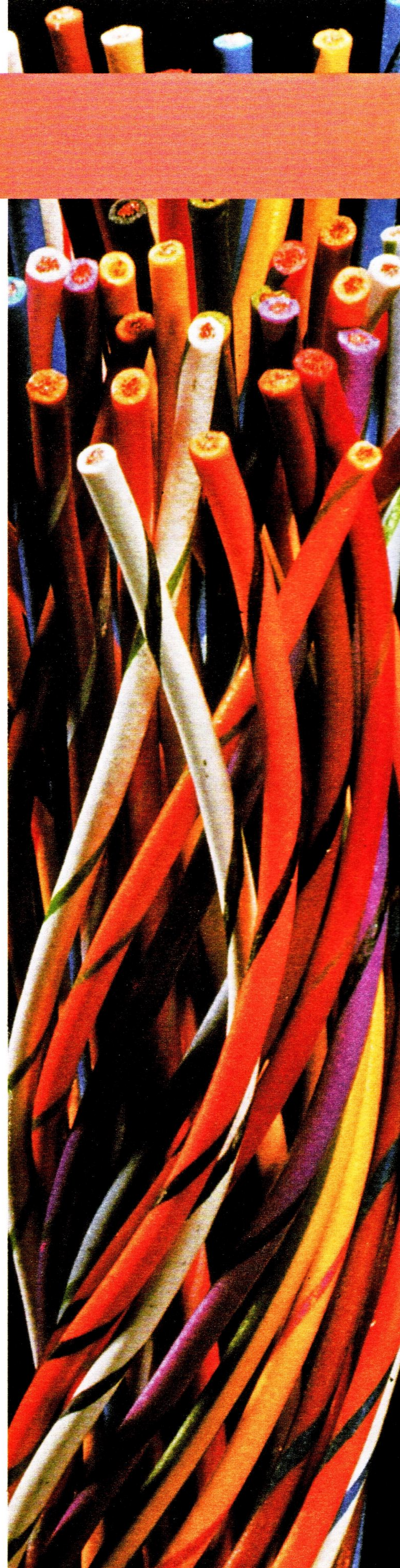
7 Pasinaudoję reikiamais duomenimis iš lentelės, raskite sandaugos *CA* vertę ten charakterizuojamam automobiliui. Ar tai didelis, ar mažas automobilis? Savo atsakymą pagrįskite.

TRANSPORTAS

Šioje skyriaus schemoje pateiktos pagrindinės sąvokos, apibūdinančios kietųjų kūnų ir skysčių bei dujų judėjimą. Atkreipkite dėmesį, kad pagrindą sudaro Niutono judėjimo dėsniai. Pagal šią schemą galite pasitikrinti, kaip aptartos temos atitinka jūsų mokymosi programą. Ji padės numatyti sritis, kurias turėtumėte panagrinėti papildomai.



KRŪVIS: SROVĖ IR LAUKAI



ŠIANDIENINIAME PASAULYJE vis labiau pasikliaujame elektra, reikalinga tiek ryšiams, tiek ir įvairiems įrenginiams maitinti. Čia nagrinėsime svarbiausias elektros krūvio savybes ir elektringųjų dalelių judėjimą medžiagoje. Yra dvi krūvio atmainos, teigiama ir neigiama, o vienas su kitu krūviai sąveikauja dvejopomis pagrindinėmis jėgomis – elektrine ir magnetine.

Elektros srovė įgalina perduoti energiją didžiuliais atstumais ten, kur ji reikalinga. Tam naudojami tokie prietaisai, kaip generatoriai, transformatoriai ir varikliai, veikiantys dėl elektromagnetinės sąveikos. Sužinosite, kaip valdomas elektros krūvio srautas sudarant grandines iš rezistorių, diodų, kondensatorių ir kitokių elementų.

Didžioji dalis elektros vartojama elektromagnetiniuose prietaisuose, todėl ir elektromagnetizmo principai nagrinėjami atsižvelgiant į jų taikymą buityje ir pramonėje, taip pat pagal kintamosios srovės panaudojimą.

Įprastose medžiagose ryšio jėgas nulemia elektronų ir protonų krūvis, o judantys krūviai gali sukurti judančius tarpusavy susijusius laukus, kuriuos įprasta vadinti spinduliavimu (tai smulkiau aprašoma antrojoje šios knygos dalyje).

9 Krūvis ir srovė



Srovės impulsai iš TENS prietaiso gali padėti prislopinti nuolatinį skausmą ir išvengti pašalinio skausmą malšinančių vaistų poveikio

JEI LANKYSITĖS pas dantų gydytoją ar susižeidę turėsite gydytis ligoninėje, ko gera gausite skausmą malšinančių vaistų. Šiuolaikiniai vaistai labai veiksmingai slopina staigų skausmą. Tačiau kai kurie žmonės kenčia dėl būsenų, sukeliančių jiems nuolatinį skausmą, o ilgai vartojant skausmą malšinančius vaistus gali būti nepageidautinas pašalinis poveikis.

Vienas iš veiksmingesnių būdų slopinti nuolatinį skausmą vadinamas transkutiniu elektriniu nervų stimuliavimu, trumpai – TENS. (Transkutinis reiškia „pro odą".) TENS vartotojai prisitvirtina prie diržo nešiojamojo stereogrotuvo dydžio dėžutę su 9 V įtampos baterija ir dviem elektrodais, kurie lipnia juosta pritvirtinami prie skaudamos kūno dalies. TENS įrenginys elektrodais siunčia trumpus žemos įtampos srovės impulsus į skaudamą vietą, o pacientas gali reguliuoti srovės stiprį ir impulso trukmę. Srovės impulsai stimuliuoja nervų galūnes, o tai slopina skausmo pojūtį.

Dauguma skausmo varginamų žmonių pripažįsta, kad TENS yra labai veiksmingas nuo aštraus skausmo – tokio, koks būna amputuotos galūnės bigėje.

Įžanga

Elektra yra dvidešimtojo amžiaus fizikos pasiekimas, turėjęs bene stipriausią poveikį didžiausiam žmonių skaičiui. Elektros srovė į daugelio milijonų žmonių namus atneša energiją, pasiekiamą jungiklio spragtelėjimu. Jungtinėje Karalystėje elektra paskirstoma valstybiniais tinklais – sudėtinga grandine, į kurią įjungti namai, fabrikai, mokyklos ir ligoninės.

Nesuskaičiuojama daugybė laiką ir darbą taupančių įrengimų veikia elektros varomi, pradedant nuo plačios šiuolaikinės ryšių sistemos iki elektrinių jutiklių, leidžiančių gydytojams reguliuoti gyvybines žmogaus kūno funkcijas. Tūkstančiai srovės amperų varo geležinkelio sistemą ir vos vieno mikroampero srovės pakanka, kad tiksėtų mūsų rankinis laikrodis.

Daugybė svarbių šiame skyriuje aprašytų idėjų yra apie šias ir daugelį kitų grandinių. Pradžiai – keletas svarbių faktų apie bandymams skirtas grandines.

Baterija sudaryta iš keleto elementų dėkliuke. Elementai turi po du elektrodus –teigiamą ir neigiamą. Žodis „baterija" vartojamas kalbant tiek apie vieną elementą, tiek ir apie jų rinkinį.

1 SROVĖS IR GRANDINĖS

Paprasčiausia grandinė yra uždaras kelias, prasidedantis nuo baterijos (ar elemento) ir į ją grįžtantis, kaip parodyta 9.1 pav. Tai, kad reikalinga uždara grandinė, rodo, jog yra kažkas nuolat judantis, keliaujantis grandine. Tai **elektros krūvį** turinčios judrios dalelės, vadinamos **krūvininkais,** o tų dalelių srautas per laiko

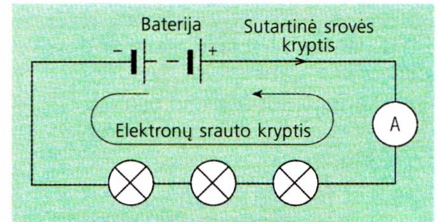
vienetą vadinamas **elektros srove.** Srovės stipris matuojamas **ampermetru** ir išreiškiamas **amperais** (simbolis – A). (Vėliau šiame skyriuje smulkiau panagrinėsime srovės ir varžos prigimtį.)

Bandymais nesunku parodyti, kaip teka grandinėje srovė. Paprasčiausia grandinė yra **nuoseklioji.** Krūvininkui judėti yra tik vienas kelias, ir jis praeina pro kiekvieną grandinėje esantį elementą, – pavyzdžiui, lemputę 9.1 pav.

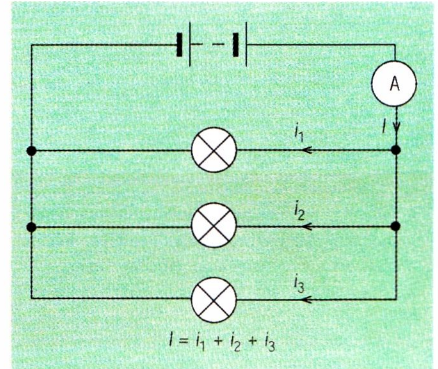
Paprastos nuosekliosios grandinės kiekviename taške srovė yra tokia pat. Grandinės elementai turi **varžą,** kuri mažina srovę; įjungus elementą į grandinę, srovė silpnėja, nes didėja grandinės varža. Kiekvienas elementas, toks kaip bet kuri lemputė iš 9.1 pav., tada gauna vis silpnesnę srovę, ir tai rodo ampermetras.

Elementus galima jungti ne nuosekliai, o **lygiagrečiai,** kaip parodyta 9.2 pav. Kiekvienos lemputės grandinė suteikia galimybę krūvininkams srūti kitu keliu. Kiekvienai naujai įjungtai lemputei maitinti reikalinga srovė, taigi srovė iš maitinimo šaltinio padidėja. Visa maitinimo srovė I lygi srovių lygiagrečiosiose šakose sumai, t. y.

$$I = i_1 + i_2 + i_3.$$



9.1 pav. **Grandinė su baterija ir trimis nuosekliai sujungtomis lemputėmis. Sutartinė srovės kryptis yra iš baterijos pliuso į minusą**

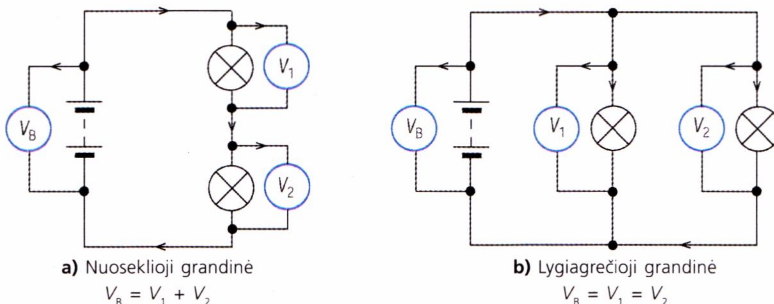


9.2 pav. **Grandinė su trimis lygiagrečiai sujungtomis lemputėmis**

2 GRANDINĖS ĮTAMPA

Voltmetru matuojamas dydis vadinamas **įtampa.** (Kas toji įtampa, sužinosime truputį vėliau šiame skyriuje.) Nuoseklioje grandinėje baterijos įtampa yra lygi įtampų visose grandinės dalyse sumai, kaip parodyta 9.3a) pav. Kai elementai sujungti lygiagrečiai, įtampa kiekviename elemente yra tokia pat.

Lygiagrečios grandinės yra labai svarbios kasdieniame gyvenime. Namuose paprastai yra viena apšvietimo grandinė, ir atskira su lizdais sienoje elektriniams prietaisams įjungti (vadinama maitinimo tinklu, arba žiedine magistrale). Prietaisai – apšvietimo arba kitokie elektriniai buitiniai – jungiami lygiagrečiai į šį tinklą.



a) Nuoseklioji grandinė
$V_B = V_1 + V_2$

b) Lygiagrečioji grandinė
$V_B = V_1 = V_2$

9.3 pav. **Įtampos matavimas nuosekliojoje ir lygiagrečiojoje grandinėse. Voltmetrai sujungiami su baterija ir su kiekviena lempute**

Kas yra elektros srovė?

Elektros srovė yra elektros krūvio srautas; bet koks judantis krūvis sukelia srovę. Krūvį neša dalelės, tokios kaip **elektronai** ar **jonai.** Elektronai paprastai keliauja laido gyslomis. Jonai juda vandens tirpaluose. Kai elektringosios dalelės juda, teka srovė. Jei elektringosios dalelės nejuda, srovė neteka.

?

A a) Sudarykite grandinę plaukų džiovintuvui ir televizoriui, įjungtiems į maitinimo tinklą.

b) Viena iš lempučių namo apšvietimo grandinėje perdegė. Kokią įtaką tai turės likusiai apšvietimo grandinės daliai ir kodėl?

?

B Atsakykite, ar teka srovė tokiose situacijose.

a) Jūsų plaukai pasišiaušia, sušukavus juos sausą dieną.

b) Valgote šokoladą su prilipusiu nedideliu metalinės folijos gabalėliu. Folijai palietus plombą pajuntate dilgtelėjimą.

c) Žaibas blyksteli danguje.

d) Sodininkas šienaudamas pievelę prakerta žoliapjovės kabelį. Kabelio galai guli nutolę vienas nuo kito ant žemės, kai sodininkas eina išjungti elektros maitinimo grandinės.

Dažniausiai vartojami elektros srovės matavimo vienetai yra

1 A = 1000 mA = 1 000 000 μA (mikroamperų)

1 mA = 10^{-3} A

1 μA = 10^{-6} A = 10^{-3} mA

Grandine judantys elektronai turi neigiamą krūvį. Jie juda iš neigiamo poliaus į teigiamą. Tačiau sutarta laikyti *srovės kryptį* grandinėje *iš pliuso į minusą* (vėl pažvelkite į 9.1 pav.). Tokią srovės kryptį pasirinko pirmieji eksperimentatoriai, tyrinėję elektros srovę. Jie suklydo, bet tai neturi reikšmės, kaip matysime vėliau.

Elektros krūvio vienetas yra **kulonas;** jo simbolis C, ir su amperais jis susijęs taip:

Kulonas – tai per vieną sekundę perduodamas elektros krūvis, tekant vieno ampero srovei.

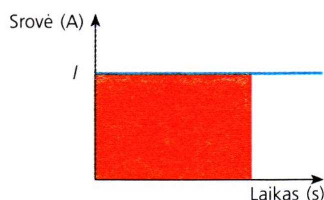
Taigi, pavyzdžiui, jei į grandinę įjungtas ampermetras rodo 1 A srovę, tai kas sekundę grandine bus perduotas 1 C krūvis. Kadangi matuojamoji srovė I yra krūvio Q srauto greitis, tai ir grandine perduotą krūvį galima apskaičiuoti.

Kadangi $I = Q / t$

tai $Q = I \times t$,

kur t matuojama sekundėmis, o Q – kulonais.

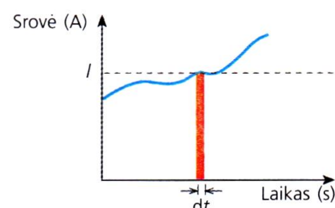
C Krūvis, pernešamas vieno elektrono, yra 1,6 × 10^{-19} C. Apskaičiuokite, kiek elektronų praeina pro duotą tašką kas sekundę, jei laidu tekanti srovė lygi 1 A.



Nuspalvintas plotas = $I \times t$

Perduodamas krūvis = Q (kulonais)

a) Srovė laikui bėgant nekinta



Nuspalvintas plotas = $I \times dt$

Perduodamas krūvis = dQ (kulonais)

b) Srovė kinta laikui bėgant

9.4 pav. **Srovės ir laiko grafikai**

9.4a) grafikas atitinka nuolatinę srovę. Plotas žemiau grafiko tiesės lygus krūviui, perduotam per nagrinėjamą laiką. 9.4b) grafikas atitinka kintamąją srovę. Nuspalvintas plotas vaizduoja krūvį, perduodamą per trumpą laikotarpį dt. Perduodamas tik nedidelis krūvio kiekis, kurį žymime dQ. Nors srovė ir kinta, ją galime laikyti pastovia per trumpą laiko atkarpą dt. Todėl galime užrašyti:

$$dQ = I \times dt$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Dabar galime pateikti bendrą srovės apibrėžimą:

Srovė lygi krūvininkų srauto greičiui.

Šituo apibrėžimu pasinaudosime vėliau, kai nagrinėsime kondensatorių veikimą.

D Apskaičiuokite srovės vertę, kai:

a) 2 C prateka lempute per 10 s.

b) 2 μC prateka šviesos diodu per 1 ms.

c) 20 nC įteka į lustą per 500 ms.

(1 nC = 10^{-9} C)

E Koks krūvis pernešamas šiuose pavyzdžiuose?

a) 5 A per valandą.

b) 50 mA per parą.

c) 5 μA per 20 s.

Visą krūvį galima nustatyti išskaidžius plotą žemiau grafiko į siauras juosteles (viena juostelė matoma 9.4 paveiksle) ir sudėjus visų jų plotus. Tai apskaičiuojama integruojant:

$$dQ = I dt$$

$$Q = \int I dt$$

3 SROVĖ IR LAISVIEJI ELEKTRONAI

Srovė medžiagoje (tokioje kaip laidas) atsiranda dėl **laisvųjų elektronų** judėjimo. Varis, naudojamas jungiamiesiems laidams, yra geras elektronų **laidininkas.** (Taip pat ir kiti metalai.) Varinis laidas sudarytas iš milijonų vienodų vario atomų. Kiekvienas atomas turi elektronų. Dauguma jų yra tvirtai prikaustyti prie atomo branduolio veikiant elektrinės traukos jėgai tarp teigiamojo branduolio ir neigiamųjų elektronų.

Vienas ar du elektronai atomo išorėje yra silpniau prikaustyti; būdami nuo branduolio toliausiai jie traukos jėgos veikiami silpniausiai. Kietajame kūne atomai yra glaudžiai susispietę, ir kiekvienas atomas gali turėti iki dvylikos gretimų atomų. Elektronas vieno atomo išorėje gali būti nutolęs nuo gretimo branduolio tiek pat, kiek ir nuo savojo branduolio. Taigi kuriam atomui jis priklauso? Tokie elektronai gali judėti tarp atomų ir vadinami laisvaisiais elektronais. Jie elgiasi kaip elektronų „debesėlis" ir juda metalo viduje atsitiktinėmis kryptimis.

Laidą įjungus į grandinę su prijungta įtampa, laisvieji elektronai traukiami link teigiamojo maitinimo šaltinio poliaus, ir elektronų „debesėlis" keliauja (dreifuoja) ta kryptimi. Tai yra **srovė.** Kiekvienas elektronas perneša $1{,}6 \times 10^{-19}$ C krūvį.

Medžiagos, turinčios daug laisvųjų elektronų, yra geri laidininkai; turinčios jų mažai, yra blogi laidininkai. Laisvųjų elektronų skaičius kubiniame metre – *krūvininkų skaičius tūrio vienete* – rodo, ar medžiaga yra geras laidininkas.

Srovė priklauso ir nuo greičio, kuriuo elektronų „debesėlis" keliauja tam tikroje medžiagoje, – jų **dreifo greičio.** Ir laidininko skerspjūvio plotas turi įtakos srovei: storas laidas atveria elektronams laisvesnį kelią nei plonas. Tai, kaip srovė priklauso nuo šių veiksnių, aprašoma **pernašos lygtyje** (žr. išplėstinį intarpą).

?

F Du laidai X ir Y pagaminti iš tos pačios medžiagos. X skerspjūvio plotas dvigubai didesnis nei Y, ir srovė pro X dvigubai didesnė nei pro Y. Nustatykite, koks yra vidutinio elektronų dreifo greičio X ir Y laiduose santykis.

Pernašos lygties išvedimas

9.5 pav. atvaizduota laido atkarpa, kuria teka I amperų srovė. Nagrinėdami šią grandinę užsirašykime būdingus dydžius ir pasižymėkime jų matavimo vienetus.

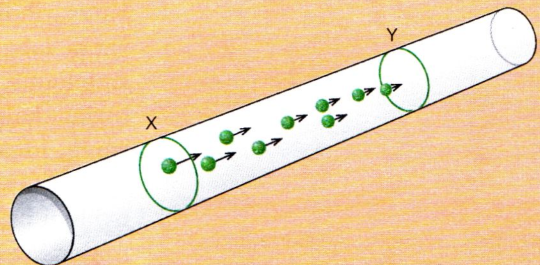
Kiekvienas elektronas perneša e kulonų krūvį ir keliauja vidutiniu dreifo greičiu v metrų per sekundę. Kubiniame laido metre yra n laisvųjų elektronų; laido skerspjūvio plotas yra A kvadratinių metrų.

Tarkime, elektronas nukeliauja nuo X iki Y per t sekundžių. Atstumas tarp X ir Y yra vt metrų, o laido tūris tarp X ir Y yra Avt kubinių metrų.

Elektronų tarp X ir Y skaičius yra lygus tūriui tarp X ir Y, padaugintam iš n, tai yra, $nAvt$. Jei kiekvienas elektronas perneša e kulonų krūvį, tai visas krūvis, pernešamas pro tašką Y per t sekundžių, yra $nAevt$.

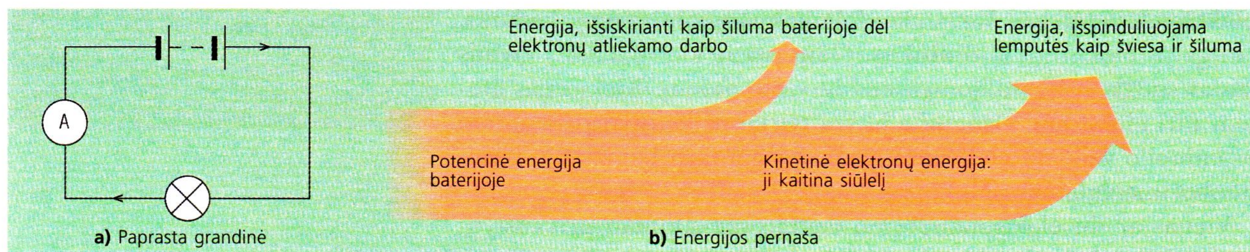
Betgi srovė yra lygi krūvio srautui per sekundę, t. y. $nAevt/t$, todėl $I = nAev$ kulonų per sekundę.

Ši išraiška tinka pavieniams e krūvio elektronams. Galime panaudoti Q bet kokiam krūviui žymėti, ir tada krūvio srautas $I = nAQv$.



9.5 pav. **Srovė laide: laisvųjų elektronų, pernešančių neigiamą krūvį, srautas. (Pagal susitarimą srovė teka priešinga kryptimi.)**

4 POTENCIALŲ SKIRTUMAS IR ENERGIJA GRANDINĖSE



9.6 pav. a) **Grandinė su lempute.** b) **Energijos pernaša toje grandinėje**

Visose grandinėse energija perduodama iš šaltinio (baterijos ar maitinimo tinklo) į grandinę įjungtiems elementams. Perduodamos energijos kiekis priklauso nuo srovės. Grandinėje su lempute, kaip 9.6 pav., elektronų kelias yra lempos kaitinimo siūlelis. Elektronai susiduria su kaitinamojo siūlelio atomais, perduoda jiems energiją (atliekamas darbas), todėl siūlelis įkaista ir spinduliuoja šviesą. Elektronai lengvai srūva variniu laidininku, – tada jie patiria mažiau susidūrimų ir laidininkas neįkaista.

Energiją, suteiktą kaitinamajam siūleliui (jame atliktą darbą), matuojame džauliais, tenkančiais pro jį praėjusiam vieno kulono krūviui. Tai yra **potencialų** (energijos) **skirtumas** kaitinamojo siūlelio galuose. Dabar galime pateikti tokį volto apibrėžimą:

1 džaulis, tenkantis kulonui = 1 voltas

Jei potencialų skirtumas tarp lemputės gnybtų yra 6 V, tatai reiškia, kad praėjus pro lemputę vienam kulonui, srovė perneša 6 J energijos kiekį, ir atlieka lemputės kaitinimo darbą.

5 VARŽA

Kodėl, kai krūvininkai srūva lempute ar varikliu, yra pernešama energija? Kodėl nuosekliai sujungtomis lemputėmis tekanti srovė silpnėja? Kodėl lygiagrečiai sujungus lemputes srovė iš šaltinio didesnė?

Atsakymai į šiuos klausimus paaiškėja pasitelkus **varžos** sąvoką:

Varža yra elektrinė medžiagos savybė, kuri verčia judančius krūvininkus skleisti energiją.

Varža riboja krūvio srautą, taigi silpnina srovę. Jungiamųjų laidų varža labai nedidelė; laidų, naudojamų lempų kaitinamiesiems siūleliams, varžos didesnės. Tačiau visi jie yra laidininkai. Izoliatoriai, kaip plastikas aplink laidus kabelyje, turi daug didesnę varžą, idealiai – be galo didelę varžą.

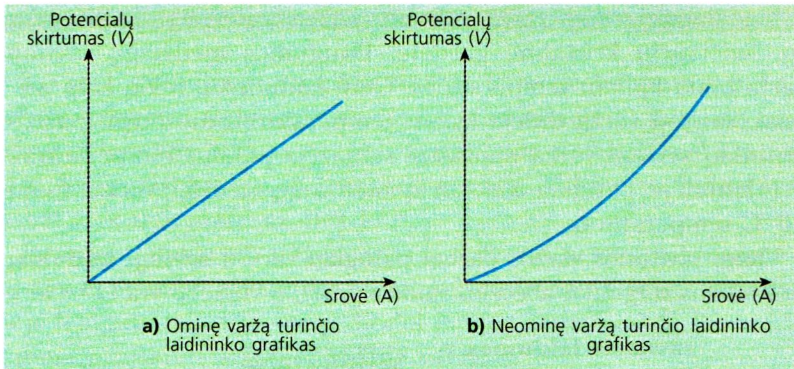
Kai kurios labai naudingos medžiagos yra ir nekokie laidininkai, ir blogi izoliatoriai. Jos yra **puslaidininkiai.** Daugiau apie puslaidininkius rasite 216 puslapyje ir 2-oje knygos dalyje (22 sk.).

Varža matuojama **omais.** Simbolis yra Ω (graikų abėcėlės raidė omega), o omas pavadintas pagerbiant Georgą Simoną Omą (*Ohm*), kuris nustatė sąryšį tarp srovės ir potencialų skirtumo. Jis matavo srovę laiduose, keisdamas prijungtą prie laidų įtampą. Jis

?

G a) Paaiškinkite, kodėl laidininkus stengiamasi gaminti su labai maža varža.

b) Pateikite kokio nors izoliatoriaus ir jo naudojimo namo elektrinėje grandinėje pavyzdį.



9.7 pav. **Potencialų skirtumo grafikai srovės atžvilgiu** a), **kai laidininko varža ominė, ir** b), **kai laidininko varža neominė**

atrado labai svarbų sąryšį, kurį paskelbė 1826 metais. Esant pastoviai temperatūrai,

potencialų skirtumas laidininko galuose = srovė laidininke × konstanta

$$V = I \times R$$

Ta konstanta yra laidininko varža R, o lygybė žinoma kaip **Omo dėsnis.** Taip pat galime sakyti, kad potencialų skirtumas laidininko galuose yra tiesiog proporcingas juo tekančiai srovei, esant pastoviai temperatūrai. Lygybė gali būti pertvarkyta šitaip:

$$R = \frac{V}{I}$$

kur V yra potencialų skirtumas laidininko galuose, o I yra srovė jame. Iš šios lygybės aišku, kad

$$1\ \Omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}}$$

H Apskaičiuokite 6 V lemputės, kuria teka 0,06 A srovė, varžą.

9.7 paveikslo grafikai rodo potencialų skirtumą dviejų rūšių laidininkuose. Kai kuriuose įtampa kinta pagal Omo dėsnį, ir tokie laidininkai vadinami **ominiais.** Esant pastoviai temperatūrai, jų varža pastovi plačiame srovių diapazone, taigi jų įtampos ir srovės priklausomybės grafikai yra tiesios linijos.

Tačiau yra ir **neominių** laidininkų, kurių savybės labai naudingos. Jų varža priklauso nuo potencialų skirtumo net esant pastoviai temperatūrai, taigi jų įtampos ir srovės priklausomybės grafikai nėra tiesės ir dažnai jų gradientas kinta staigiau. Puslaidininkinis diodas yra vykęs neominio elemento pavyzdys, kurį apžvelgsime 2-oje knygos dalyje (20 sk.).

■ Žr. 1 ir 2 klausimą.

Savitoji varža

Omas taip pat tyrinėjo, kaip laidininko varža priklauso nuo jo matmenų bei nuo medžiagos, iš kurios jis pagamintas. Esant tam pačiam potencialų skirtumui laido galuose, jo varža didėja, didėjant ilgiui l (ir $R \sim l$), ir mažėja, mažėjant skerspjūvio plotui A (ir $R \sim l/A$). Jei grandinėje laido ilgis didės, srovė mažės. Jei padidinsime laido storį, srovė taip pat didės.

I Du laidai, A ir B, pagaminti iš tos pačios medžiagos. A yra dvigubai ilgesnis už B, tačiau ir jo skersmuo dvigubai didesnis. Kurio laido varža didesnė?

Laido varža, esant pastoviai temperatūrai, priklauso nuo jo ilgio, jo skerspjūvio ploto ir jo **savitosios varžos,** žymimos ρ (graikų abėcėlės raide ro). Savitoji varža yra tam tikros laido medžiagos konstanta, ir jos vienetas yra omai, padauginti iš metrų ($\Omega \cdot$ m). Šie trys parametrai siejami šitaip:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

9.1 lentelė. **Medžiagų savitoji varža, esant 20 °C temperatūrai**

Medžiaga	Savitoji varža ρ ($\Omega \cdot m$)
Laidininkai:	
sidabras	$1{,}6 \times 10^{-8}$
varis	$1{,}7 \times 10^{-8}$
aliuminis	$2{,}8 \times 10^{-8}$
geležis	$8{,}9 \times 10^{-8}$
minkštas plienas	14×10^{-8}
konstantanas	49×10^{-8}
grafitas	3000×10^{-8}
Puslaidininkiai:	
germanis	$0{,}6 \times 10^{-8}$
silicis	2300
Izoliatoriai:	
porcelianas	10^{11}
stiklas	10^{12}
PVC	10^{12}
PTFE	10^{16}

Medžiagos savitoji varža gali būti pakeista įterpus į ją priemaišų, keičiančių kristalinę gardelę. Daugumos medžiagų savitoji varža kinta kintant temperatūrai. Gerų laidininkų, tokių kaip metalai, savitoji varža didėja kylant temperatūrai, tuo tarpu puslaidininkių savitoji varža paprastai sumažėja pakilus temperatūrai. 9.1 lentelėje pateikta kai kurių medžiagų savitoji varža, esant 20 °C temperatūrai.

Vietoj savitosios varžos dažnai patogiau vartoti **savitąjį laidumą;** jo simbolis σ (graikų abėcėlės raidė sigma), o vienetai yra $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$:

$$\textbf{savitasis laidumas} = \frac{\textbf{1}}{\textbf{savitoji varža}}$$

$$R = \frac{l}{\text{savitasis laidumas} \times A} = \frac{l}{\sigma A}$$

6 ENERGIJA IR GALIA GRANDINĖJE

Energija, perduota grandinės elementui, pavyzdžiui, lemputei, priklauso nuo srovės jame ir nuo potencialų skirtumo jo galuose. Srovė (amperais) yra pro lemputę per sekundę srūvančių kulonų skaičius, o potencialų skirtumas (voltais) yra energijos kiekis (džauliais), perduotas pro lemputę praėjusio vieno kulono. Jei padaugintume šiuos du dydžius – potencialų skirtumą iš srovės – gautume įdomų rezultatą:

džauliai kulonui × kulonai per sekundę = džauliai per sekundę

Džauliai per sekundę yra galia, arba energijos perdavimo greitis, išmatuotas vatais.

Gavome labai naudingą sąryšį:

galia (vatais) = potencialų skirtumas (voltais) × srovė (amperais)

$$W = V \times I$$

Srovei tekant elektrinę varžą turinčiu elementu perduodama energija. Perduotą energiją galime laikyti **darbu,** atliekamu varžai įveikti.

?

J 40 W, 240 V įtampos lemputėje yra kaitinamasis siūlelis tokio pat ilgio, kaip ir 40 W, 12 V automobilio tolimųjų šviesų lemputės kaitinamasis siūlelis. Abu siūleliai pagaminti iš volframo. Palyginkite jų storius.

K Dvi vienodo ilgio ir vienodo skersmens varinio ir geležinio laido atkarpas nuosekliai įjungus į tinklą, geležinis laidas įkaista smarkiau. Prijungus lygiagrečiai, smarkiau įkaista varinis laidas. Palyginkite abiejų laidų varžas ir paaiškinkite šiuos reiškinius.

Dažnai patogu pasinaudoti kitokiomis **galios** išraiškomis, kurias galime išvesti iš $V = IR$ ar $I = V/R$.

Jei žinoma *srovė* ir varža, tai

$$W = V \times I = IR \times I = I^2R$$

Taigi $\boldsymbol{W = I^2R}$

Technikoje dažnai susiduriama su nuostolingu energijos perdavimu (pvz., energija, prarasta maitinimo kabelyje ar mašinos rotoriaus apvijose); tam vartojamas I^2R nuostolių terminas.

Jei žinomos *įtampa* ir varža, tai

$$W = V \times I = V \times \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}$$

Taigi $\boldsymbol{W = \frac{V^2}{R}}$

Per tam tikrą laiką perduota energija

Jei žinome galią (pavyzdžiui, energijos, perduotos variklio, greitį), tai nesunku apskaičiuoti energijos kiekį, kuris perduodamas per tam tikrą laiką:

perduota energija = galia × laikas

$= \boldsymbol{IV \times t}$, arba $\boldsymbol{I^2Rt}$, arba $\boldsymbol{\frac{V^2}{R}t}$

?

L Apskaičiuokite energiją, išspinduliuojamą žibintuvėlio 6 V, 0,3 A lemputės per pusvalandį.

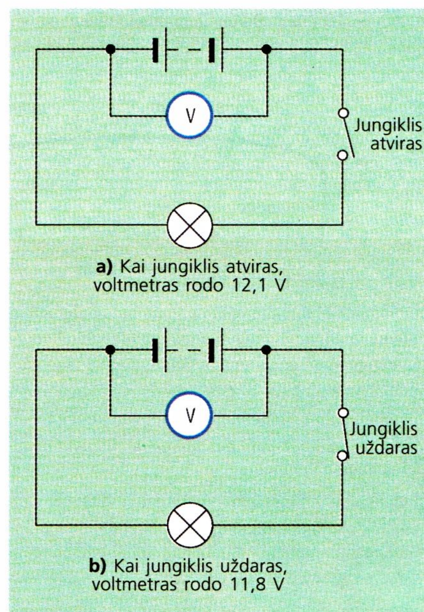
7 VIDINĖ VARŽA IR ELEKTROVARA

9.8a) pav. grandinėje jungiklis atviras ir srovė lempute neteka, tačiau voltmetro rodmenys yra 12,1 V. Grandinėje b) jungiklis uždaras ir lempute teka srovė. Voltmetras rodo potencialų skirtumą tarp lemputės gnybtų ir baterijos gnybtų. Voltmetro rodmenys dabar šiek tiek mažesni, ties 11,8 V.

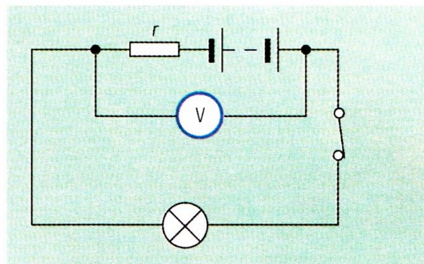
Pirmuoju atveju tik pro voltmetrą teka vos keleto mikroamperų srovė. Ši srovė nykstamai maža, palyginus su antrojoje grandinėje lempute tekančia srove. Kodėl įtampa sumažėja? Šį skirtumą galima paaiškinti baterijos **vidine varža.**

Sujungta grandine srūvant krūvininkams, pernešama energija baterijos viduje. Vykstant cheminiams pokyčiams, potencinė energija perduodama elektringosioms dalelėms: jos juda, ir sukuriama srovė. Energija vartojama ir varžai baterijos viduje įveikti, – šiek tiek „džaulių kulonui“ netenkama vidinėje varžoje, 9.9 pav. pažymėtoje *r*. Šią varžą sukelia susidūrimai tarp elektringųjų dalelių ir kitų baterijos atomų. Šitai liudija ir tas faktas, kad baterija įkaista.

Gera baterija turi nedidelę vidinę varžą, paprastai apie 1 Ω ar net mažiau. Kai krūvininkai srūva lempute, teka gana didelė srovė. 24 W lemputei ji yra maždaug 2 A. Remiantis sąryšiu $V = IR$, įtampa, susidaranti 0,5 Ω vidinėje varžoje, yra 1 V. Reikia nagrinėti *visą* grandinę, įskaitant vidinę varžą, įjungtą nuosekliai su apkrovos varža (visa varža, neįskaitant baterijos varžos).



9.8 pav. **Įtampos rodmenys, kai jungiklis atviras ir kai uždaras**



9.9 pav. **9.8 pav. grandinė, su baterijos vidine varža *r***

Elektrovara

Greitis, kuriuo energija atiduodama baterijos viduje, matuojamas džauliais kulonui, t. y. voltais. Tai baterijos įtampa priverčia srovę tekėti grandine, taip pat ir baterijoje, ir ji vadinama **elektrovaros jėga,** arba **elektrovara** (ϵ).

Kadangi energija privalo būti tvari, visa energija, atiduota į grandinę, turi būti lygi energijai, gautai iš baterijos, taigi

baterijos viduje per sekundę atiduodama energija = energija, kas sekundę atiduodama į grandinę ir suvartojama vidinei varžai įveikti

Taigi

$$\epsilon I = I^2R + I^2r$$

Padalijus abi puses iš srovės *I*:

$$\epsilon = IR + Ir$$

arba

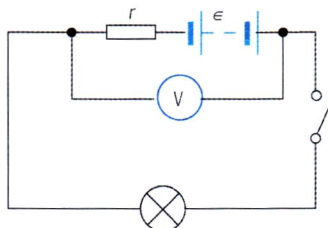
$$IR = \epsilon - Ir$$

Tai galima žodžiais nusakyti šitaip:

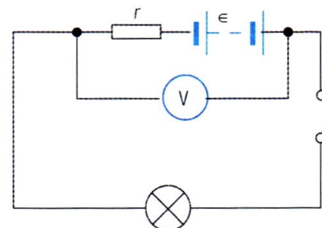
potencialų skirtumas apkrovoje = baterijos elektrovara – įtampa vidinėje varžoje

Žodinėje lygtyje nurodoma *įtampa* vidinėje varžoje, o ne potencialų skirtumas. Taip darome tam, kad atskirtume potencialų skirtumą kaip įtampą, kurią galima išmatuoti voltmetru, nuo potencialų skirtumo vidinėje varžoje, kurio negalima išmatuoti tiesiogiai.

9.10 pav. **Baterijos elektrovaros ϵ nagrinėjimas**



a) Jungiklis atviras: voltmetro rodmenys = 12,1 V



b) Jungiklis uždaras: voltmetro rodmenys = 11,8 V

9.10a) pav., kai jungiklis atviras, voltmetru išmatuojamas IR. I silpna, nes voltmetro varža didelė. Be to, r yra labai maža palyginti su R. Todėl Ir maža, ir voltmetro rodmenys IR artimi elektrovarai ϵ.

9.10b) pav., kai jungiklis uždaras, varža R yra maža, taigi srovė I yra stipri. (12 V ir 24 W lemputei R būtų 6 Ω.) Ir yra maža, tačiau gerokai didesnė už IR.

Sakytume, neįmanoma tiksliai išmatuoti baterijos elektrovaros. Pačiam voltmetrui visada reikės bent šiek tiek srovės, ir šiek tiek įtampos bus netenkama vidinėje varžoje. Naudojant vis didesnės varžos voltmetrus, rodmenys kaskart labiau priartės prie tikrosios elektrovaros, tačiau niekada jos visiškai nepasieks.

Voltai: potencialų skirtumas ir elektrovara

Elektrovara matuojamas greitis, kuriuo energija yra atiduodama 1 kulono krūviui iš energijos šaltinio – baterijos ar generatoriaus, ir kuris išreiškiamas judančio krūvio kinetine energija.

Potencialų skirtumas atitinka greitį, kuriuo krūvio kinetinė energija, tenkanti vienam kulonui, atiduodama darbui grandinėje atlikti.

Abu šie dydžiai matuojami džauliais kulonui, t. y. voltais.

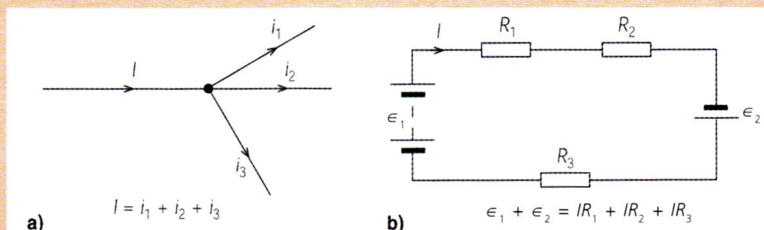
Žr. 3 ir 4 klausimus. ■

Kirchhofo dėsniai

Grandinėse vykstančius reiškinius nusako du Kirchhofo dėsniai. Pirmasis dėsnis teigia:

Srovė grandinėje yra tvari.

Tai reiškia, kad lygiagrečioje grandinėje visa į vieną tašką (mazgą) sutekanti srovė prilygsta iš jo ištekančiai srovei, kaip parodyta 9.11a) pav. Pirmasis Kirchhofo dėsnis taip pat reiškia, kad krūvis sujungimo taške nesikaupia.



9.11 pav.a) **Grandinė, iliustruojanti pirmąjį Kirchhofo dėsnį.** b) **Elektrovaros ir varžos grandinėje, iliustruojančioje antrąjį Kirchhofo dėsnį**

Antrasis dėsnis yra energijos tvermės dėsnis grandinėse; jį iliustruoja 9.11b) pav. Dėsnis teigia, kad

Elektrovarų suma lygi *IR* sandaugų sumai.

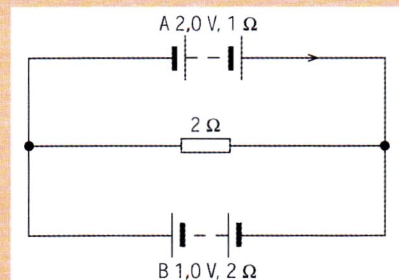
IR sandaugos yra potencialų skirtumai kiekvienoje grandinės apkrovoje, taip pat ir visose vidinėse baterijų varžose. Potencialų skirtumų suma atitinka visą perduotą energiją, atliekant vieno kulono krūviui darbą grandinėje. Elektrovarų suma yra visa energija, srovės perduota vieno kulono krūviui šaltinių viduje.

Laikant elektrovarą teigiama, o potencialų skirtumą – neigiamu, alternatyvus teiginys yra toks:

Visos grandinės įtampų suma lygi nuliui.

M Itin aukštos įtampos laboratorinis maitinimo šaltinis gali tiekti labai aukštą įtampą – iki 6000 V. Tokiai įtampai matuoti skirtas voltmetras prijungiamas matuoti potencialų skirtumą prie šaltinio gnybtų. Prijungtas prie gnybtų miliampermetras rodo 6 mA srovę, o voltmetro rodmenys sumažėja beveik iki nulio. Ką galite pasakyti apie maitinimo šaltinių vidinę varžą?

N Baterijos A elektrovara yra 2,0 V, o vidinė varža 1 Ω. Baterijos B parametrai yra 1,0 V ir 2 Ω. A ir B prijungtos prie 2 Ω rezistoriaus, kaip parodyta paveiksle. Remdamiesi Kirchhofo dėsniais, apskaičiuokite srovę, tekančią 2 Ω rezistoriumi.



PROFESORIUS GEORGAS SIMONAS OMAS (*GEORG SIMON OHM*, 1789–1854)

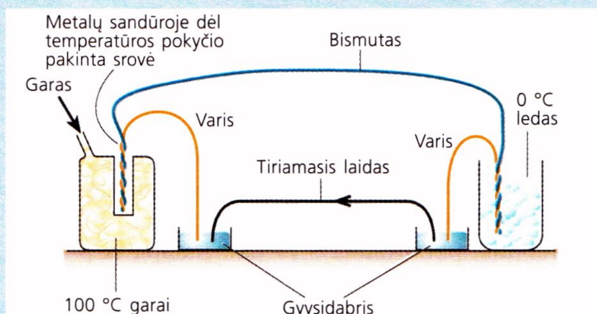
ŠIANDIEN GALIME patvirtinti Omo dėsnį eksperimentiškai su šiuolaikine aparatūra, naudodamiesi patikimais ampermetrais ir voltmetrais bei stabiliais elektros energijos šaltiniais. Omas nieko panašaus neturėjo.

XIX a. trečiajame dešimtmetyje, kai jis atliko savo eksperimentus, baterijos būdavo nepatikimos: jų elektrovara nenuspėjamai kito. Šiai problemai įveikti jis panaudojo efektą, 1822 m. atrastą kito mokslininko, vardu Tomas Johanas Zėbekas (*Seebeck*).

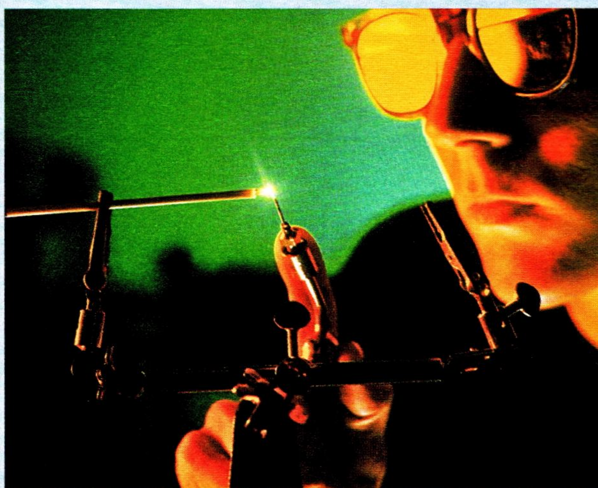
Zėbekas įrodė, kad sujungus du skirtingus metalus, tarp jų galų susidaro elektrovara. Tai vadinamoji **termopora**. Taigi, kaip 9.12a) pav., yra sukuriama įtampa tarp dviejų taškų grandinėje, sudarytoje iš vario ir bismuto laidų. Kai vienas vario/bismuto sandūros galas yra beužšąlančiame vandenyje, o kitas – garuose, susidaro įtampa, proporcinga tų temperatūrų skirtumui: juo didesnis temperatūrų skirtumas, juo didesnė įtampa. Dėl to Omas galėjo naudoti termoporą kaip tiksliai reguliuojamą elektrovaros šaltinį.

Termoporos plačiai naudojamos pramonėje temperatūrai matuoti. Didžiausias jų privalumas – kad aktyvieji kontaktai yra labai maži ir elektrovarai sukurti reikia nedaug energijos. Tai idealu, kai matuojama labai mažų kūnų temperatūra. Namų centrinio šildymo dujų katilas turi termoporą vandens temperatūrai matuoti. Pakilus vandens temperatūrai iki tam tikro lygio, įsijungia dujų tiekimo sistema.

Savo tyrinėjimuose Omas leido srovę skirtingo ilgio variniais laidais, ir dar naudojo kitą neseną atradimą srovei matuoti. 1819 m. danų mokslininkas Hansas Erstedas (*Oersted*) atrado, kad magnetukas, pakabintas šalia laido, pasisukdavo, kai laidu būdavo leidžiama srovė. Omas panaudojo šį nuokrypį tiksliam srovės matavimui. Su šia, regis, netobula technika jis atrado dėsnį, pavadintą jo vardu, – vieną iš pagrindinių eksperimentinės fizikos dėsnių.



9.12a) pav. **Termoporinis prietaisas, išrastas Zėbeko ir panaudotas Omo jo tyrinėjimuose. Strėliukėmis nurodyta krūvininkų tėkmės kryptis**



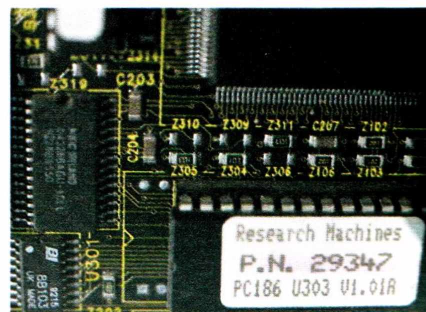
9.12b) pav. **Termoporos gaminimas: du laidai, vienas iš platinos, kitas iš rodžio bei platinos lydinio, suvirinami, kad sudarytų vieną termoporos sandūrą. Kai dviejų termoporos galų temperatūra skirtinga, tarp jų ima tekėti srovė. Prijungta prie tinkamo matuoklio, termopora gali būti panaudota kaip termometras arba termostatas**

8 PAPRASTOS GRANDINĖS SU REZISTORIAIS

Rezistorius yra elementas, turintis tam tikro dydžio varžą. Rezistoriai gaminami standartinių verčių, nuo omų iki megaomų, ir nustatyto tikslumo, arba **tolerancijos.** Jie gaminami iš daugybės medžiagų – iš anglies, metalo plėvelės ant keraminio pagrindo, ar suvytos vielos. Šiuolaikinėse elektroninėse mikrograndinėse rezistoriai užpurškiami ant grandinės plokštės specialiais didelę varžą turinčiais dažais. Aprašysime keletą rezistorių taikymų.

Srovei riboti naudojami rezistoriai

Kai kuriems prietaisams reikalinga silpna srovė. Geras pavyzdys yra **šviesos diodas** (ŠD), naudojamas kaip įjungimo/išjungimo indikatorius daugelyje elektroninių prietaisų, kaip antai televizoriuose, vaizdo grotuvuose ir kompiuteriuose.



9.13 pav. **Šiuolaikinėse elektronikos grandinėse naudojami miniatiūriniai lustų elementai. Čia pavaizduoti elementai, tarp kurių – ant lusto paviršiaus montuojami rezistoriai (Z310 ir t.t.) bei kondensatoriai (C203 ir C204)**

ŠD skaisčiai šviečia jau prijungus 2,0 V įtampą, o srovė pro jį turi būti ne didesnė kaip 20 mA.

PAVYZDYS

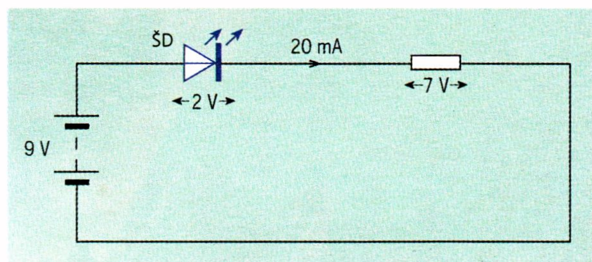
K Norime panaudoti ŠD su 9 V šaltiniu, todėl nuosekliai su ŠD jungiame rezistorių, kad apribotume srovę. Kokia rezistoriaus varža?

A Grandinė pavaizduota 9.14 pav. Įtampa tarp rezistoriaus gnybtų yra

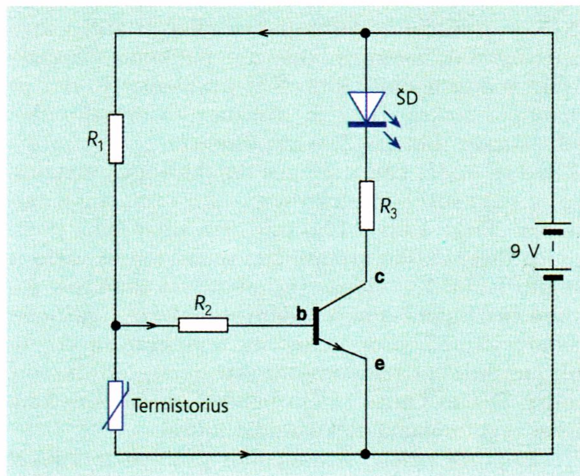
$$9{,}0\ \text{V} - 2{,}0\ \text{V} = 7{,}0\ \text{V},$$

o srovė grandinėje turi būti 20 mA. Remiantis sąryšiu $V/I = R$, ribojančiojo rezistoriaus varža turi būti

$$7{,}0\ \text{V}/20\ \text{mA} = 350\ \Omega$$



9.14a) pav. **Grandinė su ŠD, prijungtu prie 9 V baterijos**



9.14b) pav. **Paprasto į temperatūrą reaguojančio jungiklio grandinė. Kai termistoriaus temperatūra pakinta, „įjungiamas" tranzistorius. Po to potencialų skirtumas tarp tranzistoriaus gnybtų (c ir e) krinta beveik iki nulio. Potencialų skirtumas rezistoriuje R_3 ir ŠD tampa beveik 9 V, kaip ir 9.14a) pav. ŠD ima švytėti, kai pakyla temperatūra**

Rezistoriai gaminami standartinių verčių, ir artimiausios yra 330 Ω arba 390 Ω. Pasirinkus 330 Ω varžą srovė viršytų 20 mA ir dėl to ŠD galėtų perdegti. Todėl reikia panaudoti 390 Ω rezistorių. Tai reiškia, kad ŠD gali švytėti ne taip skaisčiai, užtat nebus pavojaus jį sugadinti.

Rezistorių jungimo būdai

Nuosekliai sujungti rezistoriai

Norint rasti keleto nuosekliai sujungtų rezistorių pilnąją varžą, vadinamą **ekvivalenčiąja varža,** reikia *sudėti* tų rezistorių varžas. Trijų nuosekliai sujungtų rezistorių, kurių varžos R_1, R_2 ir R_3, varža R_T randama pagal formulę

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Lygiagrečiai sujungti rezistoriai

Trijų lygiagrečiai sujungtų rezistorių, kurių varžos R_1, R_2 ir R_3, pilnoji varža R_T randama pagal formulę

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

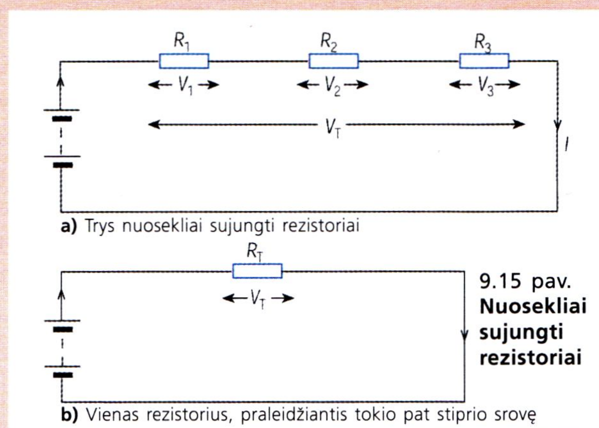
Tuo galite įsitikinti įrašę kokias nors vertes į lygtis ir apskaičiavę R_T. Ji visada mažesnė už bet kurio iš lygiagrečiai sujungtų rezistorių varžą.

?

O Trys rezistoriai, 10 Ω, 100 Ω ir 1000 Ω, sujungti lygiagrečiai. Apskaičiuokite šios schemos ekvivalenčiąją varžą.

Lygčių rezistoriams išvedimas

Nuosekliai sujungti rezistoriai



9.15 pav. Nuosekliai sujungti rezistoriai

9.15 pav. atvaizduoti trys nuosekliai sujungti rezistoriai ir baterija. Visų trijų rezistorių įtampa yra V_T, o srovė grandinėje yra I amperų. Tada, jei potencialų skirtumai rezistorių gnybtuose atitinkamai yra V_1, V_2 ir V_3, galime užrašyti:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

Taip pat žinome, kad potencialų skirtumas tarp vieno rezistoriaus gnybtų yra lygus IR (srovė grandinėje visur ta pati).

Todėl $$V_T = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

Galime pakeisti tuos tris rezistorius vienu, praleidžiančiu tokio pat stiprio srovę, kaip ir 9.15a) pav. Tarkime, jo varža R_T. Vadinasi,

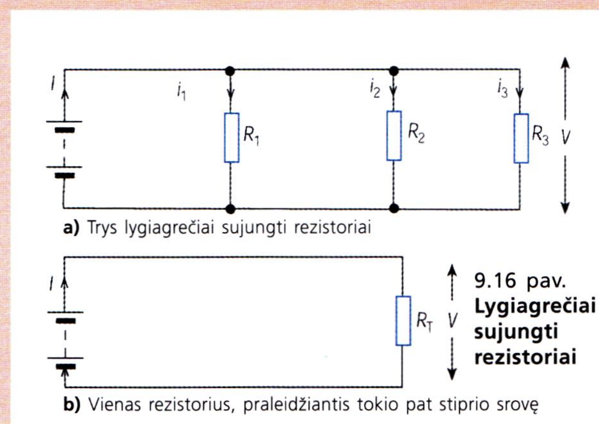
$$V_T = IR_T$$

arba $$IR_T = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

Srovė I abiejose lygybės pusėse gali būti išbraukta:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Lygiagrečiai sujungti rezistoriai



9.16 pav. Lygiagrečiai sujungti rezistoriai

9.16 pav. atvaizduoti trys lygiagrečiai sujungti rezistoriai R_1, R_2 ir R_3 ir baterija, kurios vidinė varža laikoma lygia nuliui. Šį kartą potencialų skirtumas tarp kiekvieno rezistoriaus gnybtų yra toks pat; pažymėkime jį V. Iš baterijos tiekiama srovė pasiskirsto taip, kad

$$I = i_1 + i_2 + i_3$$

kur i_1, i_2 ir i_3 yra R_1, R_2 ir R_3 rezistoriais tekančios srovės. Tarkime, pakeičiame tuos tris rezistorius vienu, kurio varža R_T, praleidžiančiu tokio pat stiprio srovę ir tarp kurio gnybtų yra toks pat potencialų skirtumas. Tada

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Abiejose lygybės pusėse išbraukę potencialų skirtumą V, gauname:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Potencialo daliklis

9.17 pav. pateiktoje grandinėje atvaizduoti du rezistoriai, nuosekliai sujungti su baterija. Su tokia grandinėle galime gauti bet kokią įtampą nuo nulio iki maitinimo įtampos šių dviejų rezistorių sujungimo taške (t. y. potencialų skirtumas tarp rezistoriaus R_2 gnybtų). Pasirodo, ši įtampa yra priklausoma nuo tų dviejų rezistorių varžos ir maitinimo įtampos.

Baterijos įtampa, arba elektrovara, yra V_B. Grandinė yra paprasta nuoseklioji grandinė, taigi

$$V_B = V_1 + V_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

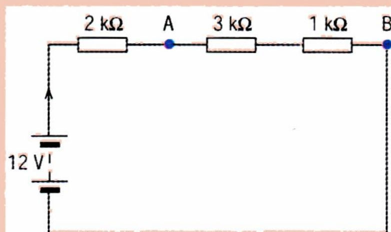
Potencialų skirtumą tarp R_1 gnybtų rasime iš

$$V_1 = IR_1$$

?

P a) Užrašykite lygtis, kuriomis remdamiesi įrodytumėte, kad

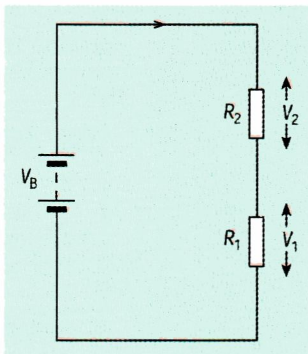
$$V_2 = V_B \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



b) Potencialų skirtumas tarp 3 kΩ rezistoriaus gnybtų yra 6 V. Kaip perjungtumėte rezistorius, kad potencialų skirtumas tarp taškų A ir B taptų 6 V?

Jei imtume potencialų skirtumų tarp R_1 gnybtų ir tarp baterijos gnybtų santykį, tai gautume

$$\frac{V_1}{V_B} = \frac{IR_1}{I(R_1 + R_2)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{arba} \quad V_1 = V_B \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



Ši schema vadinama **potencialo dalikliu,** kadangi ja galima reikiamu santykiu padalyti maitinimo šaltinio įtampą V_B. Intarpe apie komparatorių potencialo daliklis panaudotas „nustatyti" vieno iš dviejų operacinio stiprintuvo įvadų įtampą. Ši įtampa nustatoma parenkant tinkamas dviejų rezistorių vertes.

9.17 pav. **Dviem rezistoriais potencialo daliklyje paskirstoma įtampa**

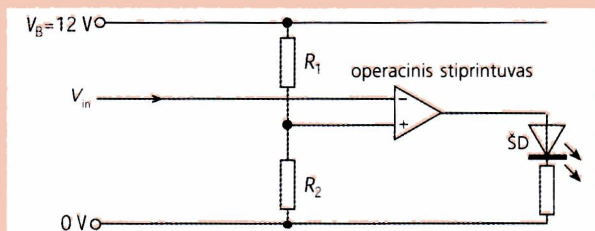
Komparatorius

Komparatorius yra elektroninis jungiklis. Jis palygina dvi įtampas. 9.18 pav. pavaizduotoje grandinėje įjungtas šviesos diodas įsižiebia, kai matuojamoji įtampa V_{in} prilygsta ar tampa didesnė už atskaitos įtampą. Komparatorius turi du įvadus, vadinamus „keičiančiuoju" (–) ir „nekeičiančiuoju" (+) įvadais. Naudojant potencialo daliklį, pasirinktoji atskaitos įtampa prijungta prie nekeičiančiojo įvado. Grandinėje įjungtas nuo 0 iki 12 V maitinimo šaltinis, taigi įtampa nekeičiančiajame įvade bus tokia:

$$V_{at} = 12 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Tarkime, atskaitos įtampą pasirinkome lygią 4 V. (Tai reikštų, kad ŠD švytėtų, kai įvado įtampa lygi arba didesnė nei 4 V.) Tada

$$4 = 12 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \text{ arba } \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3}.$$



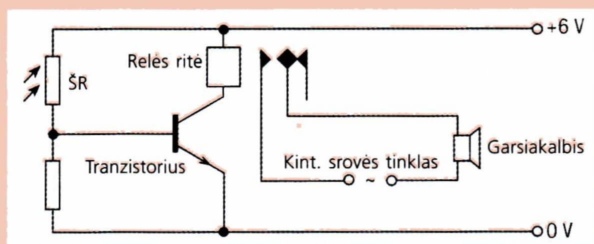
9.18 pav. **Komparatoriaus grandinė**

Komparatoriams reikalingos labai silpnos srovės, paprastai mažesnės nei 1 mikroampero. Tai reiškia, kad srovė rezistoriuose bus labai nedidelė, taigi jų varžos turėtų būti didelės. Šioje grandinėje varžos R_1 = 200 kΩ ir R_2 = 100 kΩ būtų tinkamos.

Šviesinis rezistorius (fotorezistorius)

Potencialo daliklis plačiai naudojamas elektronikoje nustatyti reikiamai įtampai konkrečiame grandinės taške. Jį galima naudoti, kai vienas iš dviejų rezistorių atlieka tam tikrą funkciją, kaip antai reaguoja į šviesą (ŠR).

ŠR varža priklauso nuo į jį krintančios šviesos intensyvumo. Tamsoje jo varža labai didelė, paprastai dešimčių kiloomų. Ryškioje šviesoje ši varža sumažėja maždaug iki 300 Ω. Taigi kintant šviesai potencialų skirtumas pastovios 1 kΩ varžos rezistoriaus gnybtuose taip pat kis. Tačiau kad ir kokia būtų ŠR varža, sudėjus potencialų skirtumus jo ir pastoviojo rezistoriaus gnybtuose, bendra įtampa turi būti lygi maitinimo šaltinio įtampai.

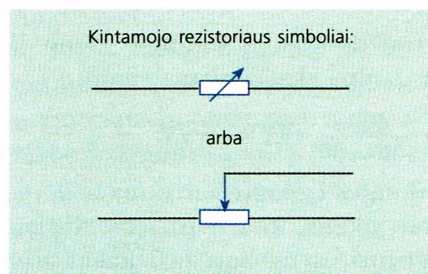


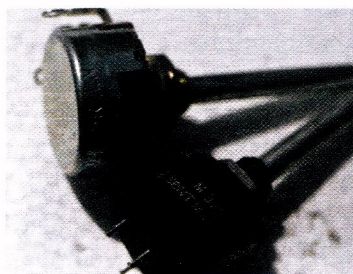
9.19 pav. **Potencialo daliklio grandinė, naudojama kaip įsilaužimo signalas. Jame naudojamas šviesinis rezistorius ir pastovios varžos rezistoriai**

9.19 pav. maitinimo šaltinio įtampa yra 6 V. Kai ŠR varža didelė (tamsoje), potencialų skirtumas jame bus didesnis, maždaug 5,5 V, ir tik apie 0,5 V liks kitam rezistoriui. Ryškioje šviesoje padėtis pasikeičia – tik 1 V ŠR gnybtuose, ir apie 5 V išilgai pastoviojo rezistoriaus.

Kai šviesa krinta į ŠR, padidėjus pastoviojo rezistoriaus įtampai įsijungia tranzistorius, kuris savo ruožtu paleidžia relę, kuri įjungia į grandinę įjungtą garsinį signalą.

Kintamieji rezistoriai – reostatai ir potenciometrai



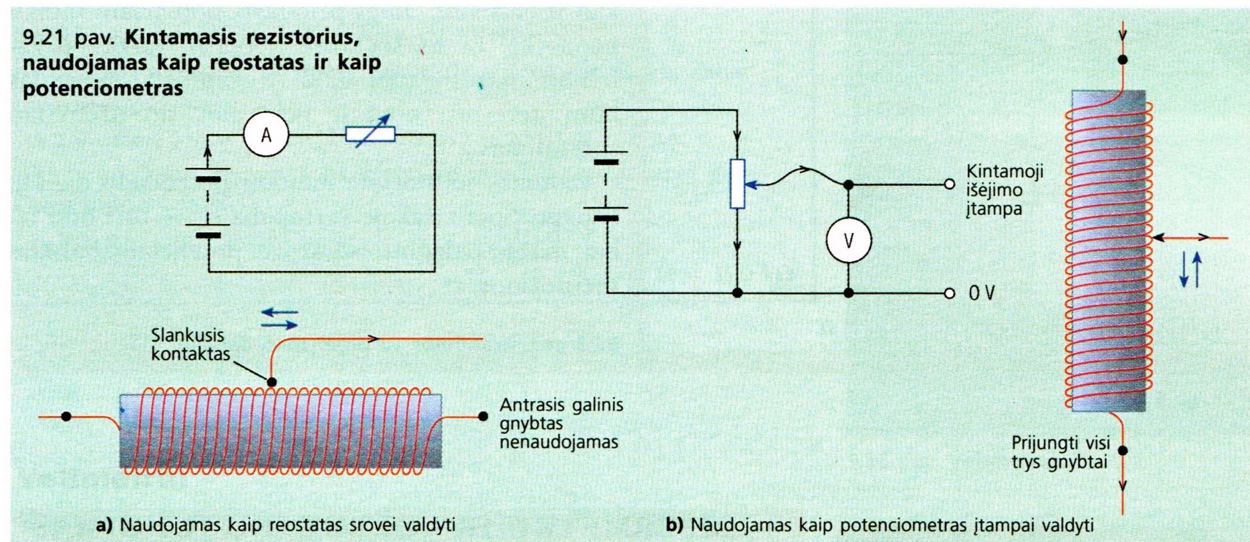


9.20 pav. **Kintamieji rezistoriai**



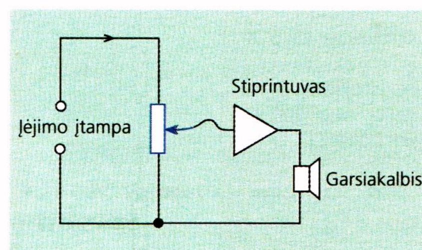
Kintamieji rezistoriai skiriasi nuo pastoviųjų rezistorių. Kintamieji rezistoriai paprastai turi tris gnybtus – du rezistoriaus galuose ir trečiąjį – slankiklį (9.20 ir 9.21 pav.). Kintamaisiais rezistoriais gali būti valdoma srovė arba įtampa.

9.20 pav. grandinėje paprastas kintamasis rezistorius yra įjungtas kaip **reostatas** srovei valdyti. Į grandinę įjungiama varža tarp vieno iš galinių gnybtų ir slankiojo (derinamojo) kontakto. Judant slankiajam kontaktui, srovė grandinėje kinta – jos vertę rodo ampermetras.



9.21 pav. **Kintamasis rezistorius, naudojamas kaip reostatas ir kaip potenciometras**

Kintamasis rezistorius 9.21b) pav. naudojamas įtampai valdyti. Jis veikia kaip **potencialo daliklis** (arba **potenciometras**) ir išnaudoja visus tris gnybtus. Slankusis kontaktas padalija kintamąjį rezistorių į dvi dalis. Išvado iš potenciometro įtampa gali kisti nuo nulio iki maitinimo šaltinio įtampos, slankiuoju kontaktu keičiant varžą nuo didžiausios vertės iki nulio. Tai, beje, labai praverčia eksperimentiniame darbe, kai reikia kintamosios įtampos maitinimo šaltinio. Elektronikoje tokia grandinė naudojama kaip paprastas **garsumo** reguliatorius garso stiprintuvo grandinėje. Stumdydami slankiklį, deriname garsumo reguliatorių.

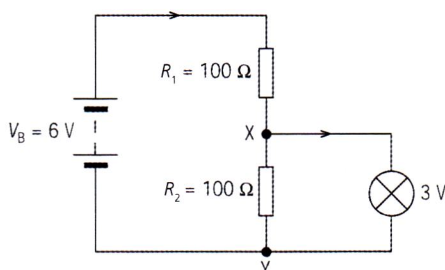


9.22 pav. **Potenciometras, naudojamas kaip garsumo reguliatorius**

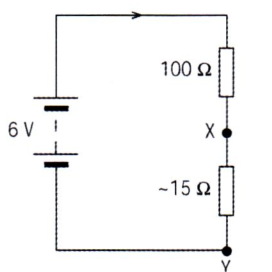
Dar apie potencialo daliklius

Grandinės su potencialo dalikliais labai naudingos, tačiau – būkite atsargūs. Iki šiol darėme prielaidą, kad į potencialo daliklio ir potenciometro grandines įjungti elementai srovės nevartoja. 9.17 pav. srovę laikėme vienoda abiejuose rezistoriuose. 9.21b) pav. tarėme, kad yra menkutė srovė laide nuo kintamojo rezistoriaus slankiklio.

Iš tikrųjų, žinoma, šiokia tokia srovė visada teka iš potencialo daliklio į prie jo prijungtus elementus. Sakykime, jūs norite įžiebti 3 V 0,2 A lemputę, o turite tik 6 V bateriją. Atrodytų, galėtume panaudoti grandinę, pavaizduotą 9.23a) pav., tačiau tai būtų klaida.



(a) Potencialo daliklis, panaudotas grandinėje su 6 V maitinimo šaltiniu ir 3 V lempute. Ar lemputė įsižiebs?



(b) Ekvivalenčioji varža tarp X ir Y yra apie 15 Ω.

9.23a) pav. atvaizduotoje grandinėje vieno iš dviejų rezistorių įtampa skaičiuojama šitaip:

$$6\,\mathrm{V}\times\frac{100}{100+100}=6\,\mathrm{V}\times\frac{1}{2}=3\,\mathrm{V}$$

Kai lemputė prijungta lygiagrečiai vienam iš rezistorių, galėtume tikėtis, kad ji įsižiebs. Tačiau pati lemputė irgi turi varžą, kuri turi įtakos srovei. Jei lemputei įsižiebti reikia 3 V įtampos, tai ja tekanti srovė lygi 0,2 A. Taigi lemputės varža yra 3 V/0,2 A = 15 Ω.

Prijungta lemputė pakeičia grandinę. Efektyvioji varža tarp X ir Y sumažėja, nes lemputė yra lygiagreti vienam iš 100 Ω rezistorių. Net be tikslių skaičiavimų žinome, kad atstojamoji varža tarp X ir Y dabar bus mažesnė nei 15 Ω. Potencialų skirtumas V tarp X ir Y dėl to bus daug mažesnis nei 3 V.

Pagal

$$V_2=V_B\frac{R_2}{R_1+R_2}$$

ji apytiksliai lygi: $6\times\frac{15}{100+15}=0{,}8\ \mathrm{V}.$

Esant 0,8 V įtampai, lemputei nepakaks srovės, kad ji įsižiebtų. Taigi pritaikyti potencialo daliklį nepavyko. Be to, šią srovę riboja R_1 varža – ji gali būti mažesnė nei 0,06 A! Paprastas reostatas būtų geresnis, nors ir neidealus šio uždavinio sprendimas.

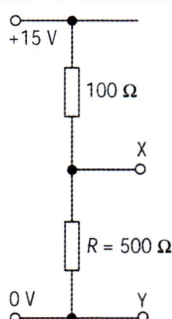
Vadinasi, jei norime naudoti potencialo daliklį, lygiagrečioje atšakoje vartojama srovė turi būti labai maža, palyginti su srove potencialo daliklio rezistoriuose.

9.23 pav. Grandinės su potencialo dalikliu

■ Žr. 5 ir 6 klausimus.

?

K **Kiek pakinta potencialų skirtumas tarp X ir Y pakeitus rezistoriaus R vertę nuo 500 Ω iki 2000 Ω?**

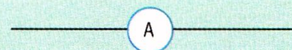


9 AMPERMETRŲ IR VOLTMETRŲ JUNGIMAS

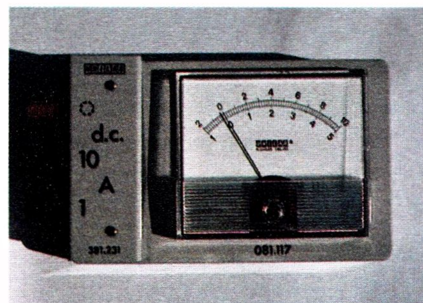
Matuojant svarbiausia, kad matavimo procedūra nepakeistų matuojamųjų dydžių. Tačiau kartais tenka daryti kompromisus. Štai elektriniuose matavimuose neįmanoma išmatuoti srovės jos nė kiek nepakeičiant. Jei pokytis toks nedidelis, kad būtų galima į jį neatsižvelgti, tai tokį pokytį laikome priimtinu. Klausimas, kylantis atliekant bet kokį bandymą, yra toks: kiek nežymu yra tai, į ką neatsižvelgiame? Labai apytiksliai imant, visa, kas sudaro 1 procentą ar mažiau, yra priimtina. Kai kuriomis aplinkybėmis gali tekti taikstytis su didesnėmis paklaidomis, taigi svarbu, kad žinotume leistinos paklaidos didumą.

Ampermetrai

Ampermetrai skirti srovei matuoti. Idealus ampermetras privalėtų turėti varžą, lygią nuliui, kad tinkamai įjungtas nuosekliai į grandinę, srovės jis nepaveiktų – tik išmatuotų. Tačiau realūs ampermetrai visuomet turi varžą, kuri turi būti kiek įmanoma mažesnė palyginti su visos grandinės varža.



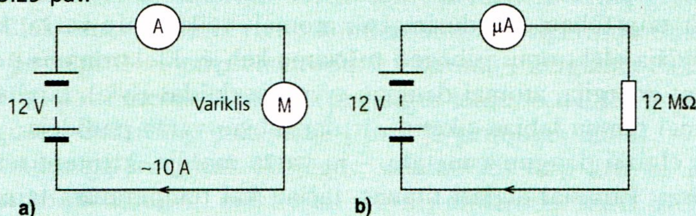
Ampermetro simbolis



9.24 pav. **Ampermetras**

PAVYZDYS

K 9.25a) pav. grandinėje atvaizduota 12 V baterija, prijungta prie galingo variklio. Nesant apkrovos, variklis vartoja apie 10 A srovę. Įvertinkite variklio varžą.



A Tarus, kad vidinė baterijos varža yra nykstamai maža,

varža = įtampa/srovė = 12/10 = 1,2 Ω

K Šioje grandinėje įjungto ampermetro varža turėtų sudaryti apie vieną šimtąją grandinės varžos dalį, kad paklaida būtų priimtina. Apskaičiuokite tinkamo ampermetro srovei grandinėje matuoti varžą.

A Ampermetro varža = 1,2/100 = 0,012 Ω.

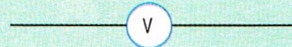
K Variklis pakeičiamas 12 MΩ varža, žr. 9.25b) pav. Kokia dabar tekės srovė?

A Dabartinė srovė = $12/(12 \times 10^6)$ = 1,0 × 10 A = 1 μA.

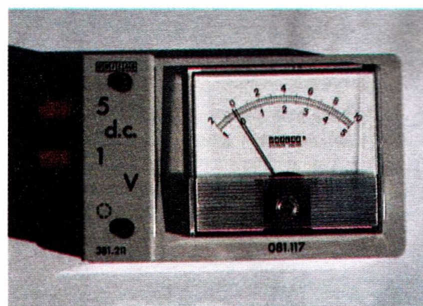
K Ampermetro, įjungto į šią grandinę srovei matuoti, varža gali būti didesnė. Kokia?

A Pakeisto ampermetro varža = $(12 \times 10^6)/100$

= 120 000 Ω = 120 kΩ.



Voltmetro simbolis

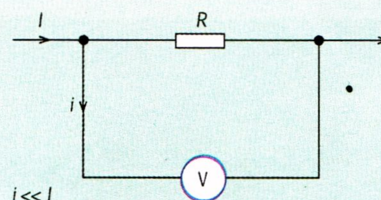


9.26 pav. **Voltmetras**

Voltmetrai

Voltmetras jungiamas į grandinę lygiagrečiai, kai norima išmatuoti potencialų skirtumą toje grandinės dalyje. Idealaus voltmetro varža turėtų būti tokia didelė, kad juo visiškai netekėtų srovė. Labai didelės varžos skaitmeniniai voltmetrai iš tikrųjų vartoja nykstamai mažą srovę. Tačiau praktikoje voltmetru visada teka šiokia tokia srovė; antraip jis neveiktų.

9.27 pav. vartojama įjungto voltmetro srovė turi būti labai maža palyginti su srove, tekančia rezistoriumi. Praktiškai vartojama voltmetro varža turi būti daug didesnė už varžą toje grandinės dalyje, kurioje matuojamas potencialų skirtumas. Paprastai judamosios ritės voltmetras turi apie 100 kΩ varžą, o skaitmeninio voltmetro varža net 10 MΩ – šimtą kartų didesnė.



9.27 pav. **Voltmetras, prijungtas prie rezistoriaus**

■ Žr. užduotyje šio skyriaus pabaigoje daugiau apie elektros matavimą.

10 DAR APIE LAIDININKUS

Šio skyriaus pradžioje aptarta laisvųjų elektronų sąvoka pateikia mums paprastą modelį, kuriuo remdamiesi galime paaiškinti varžą.

Nagrinėjant laisvųjų elektronų judėjimą taip pat nesunku paaiškinti, kodėl gerų laidininkų varža didėja kylant temperatūrai.

Kai laide teka srovė, kai kurie elektronai juda „laisvai". Elektroną veikia jėga, sukelta elektrinio lauko, kurį sukuria prijungta įtampa. Įtampa greitina elektroną, ir jis įgyja kinetinės energijos. Matyt, jis netoli tenukeliaus iki susidurs su atomu, kuris ir pats turi virpesių kinetinės energijos. Susidūrimo metu elektronas praranda šiek tiek savo kinetinės energijos – atiduoda atomui. Po susidūrimo jis vėl bus greitinamas, iki vėl susidurs ir neteks energijos, ir taip toliau. Susidūrimai su atomais veikia kaip varža, kuri neleidžia elektronui įsibėgėti tuščiame kelyje. Elektronams perduodant energiją, atomai daugiau svyruoja (laidas įšyla), taigi susidūrimai tampa labiau tikėtini, ir dar labiau varža padidėja.

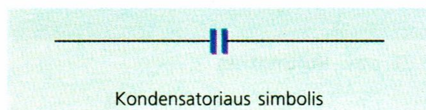
Taip elgiasi dauguma metalų, – jų varža mažėja, krintant temperatūrai. Panašiai elgiasi titanas, tačiau kai temperatūra tampa labai žema (0,39 K, –272,8 °C), varža prilygsta nuliui. Tokioje temperatūroje, titanas tampa vadinamuoju **superlaidininku.**

Pastaraisiais metais atrastos medžiagos, kurios tampa superlaidininkais daug aukštesnėse, lengviau pasiekiamose temperatūrose nei 0,39 K. Medžiagos, kurių pagrindinis komponentas yra bismuto oksidas, tampa superlaidininkais maždaug 77 K, –196 °C temperatūroje, kurią visai nesunku pasiekti naudojant kaip aušalą skystą azotą. Jos vadinamos aukštatemperatūriais superlaidininkais.

Puslaidininkiai

Tarp puslaidininkinių medžiagų yra ir gerai pažįstama – silicis. Kitos yra germanis, švino sulfidas, selenas ir galio arsenidas. Esant įprastoms temperatūroms, grynas silicis nėra geras izoliatorius, bet ir ne geras laidininkas, kadangi esant šioms temperatūroms silicis turi nedaug laisvųjų elektronų. Tačiau pakaitinus silicį, gautoji energija išlaisvina daugiau elektronų.

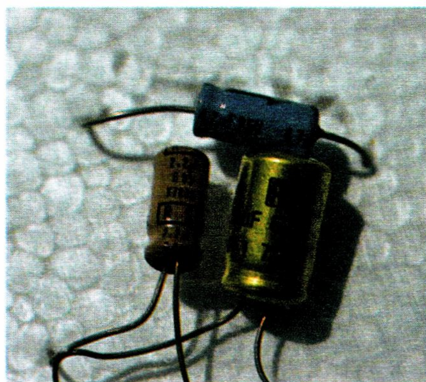
Vadinasi, grynos puslaidininkinės medžiagos ne tokios naudingos įprastinėje temperatūroje. Norint pagaminti puslaidininkį, kuris būtų naudingas, grynoji medžiaga „stimuliuojama", pridedant nedidelius priemaišų atomų kiekius. Puslaidininkiai smulkiau nagrinėjami 2-oje knygos dalyje (22 sk.).



Kondensatoriaus simbolis

11 KRŪVIS IR KONDENSATORIAI

Fotoaparato blykstei reikia laiko sukaupti pakankamai energijos, kad lemputė skaisčiai blykstelėtų. Šiai energijai kaupinti blykstės mazgas turi įtaisytą **kondensatorių**, kaip pavaizduota 9.28 pav. – elementą, skirtą sukaupti tam tikrą krūvį ir prireikus jį atiduoti. Kondensatorius sudarytas iš dviejų laidžių plokštelių – elektrodų, atskirtų izoliacinio sluoksnio, kartais vadinamo dielektriku.



9.28 pav. **Kondensatoriai**

Įkrova ir iškrova

Kondensatorius, įjungtas nuoseklioje nuolatinės srovės grandinėje, pavaizduotas 9.29 pav., o kaip jis įsikrauna ir išsikrauna – 9.30a) ir b) pav. Abiem atvejais mikroampermetrai su nuline skalės centro padala registruoja bet kokios krypties srovę. Atidžiai perskaitykite parašus po jais.

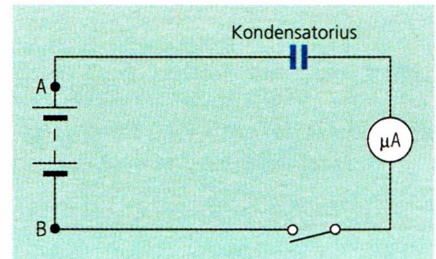
Srovė yra krūvio srautas. Krūvio srautas visada iš pradžių esti didelis, tačiau sparčiai mažėja. 9.30a) pav. srovė teka iš baterijos į grandinę. Vienas elektrodas įkraunamas teigiamai, o kitas – neigiamai. Laisvąjį laidą perkėlus (9.30b) pav.) į tašką A, kondensatorius „iškraunamas“. Elektroduose sukauptas krūvis grįžta ten, iš kur atėjęs!

Po kurio laiko baterija (9.30a) pav.) perskirsto krūvį grandinėje. Elektronai juda iš vieno kondensatoriaus elektrodo link kito, bet jie nepraeina tarp elektrodų. Elektronai į neigiamą elektrodą (9.30a) pav.) ateina iš prie jo prijungto laido, o tie, kurie palieka teigiamą elektrodą, nukeliauja į prie jo prijungtą laidą.

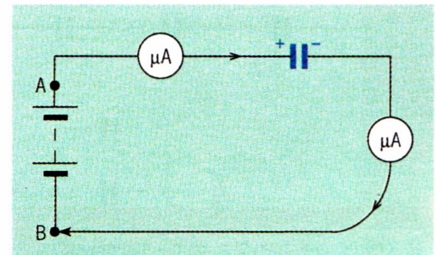
Kintamąją srovę sukelia jėgos, veikiančios tarp krūvių. Įkraunant kondensatorių, elektronai srūva į elektrodą, kuris įsielektrina neigiamai. Iš pradžių tai vyksta sparčiai, ir teka didelė srovė. Elektronai pasklinda, ir stūmos jėgos tarp jų nedidelės. Kaupiantis daugiau elektronų, šios jėgos didėja, elektronams darosi sunkiau patekti į elektrodą (srovė silpnėja), iki pagaliau susitelkia tiek daug elektronų, kad stūmos jėgos neleidžia kauptis daugiau. Kondensatorius visiškai įkrautas.

(Tuo pat metu vyksta panašus procesas teigiamame elektrode, tik čia elektronai palieka elektrodą, ir veikia traukos jėgos.

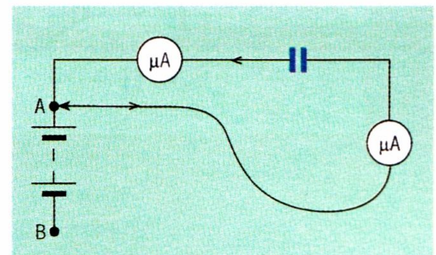
Baterija atlieka darbą priversdama krūvį judėti, ir kondensatoriuje kaupiama energija. Kondensatoriui išsikraunant, sukauptoji energija „atlieka darbą“, versdama krūvį judėti atgal.



9.29 pav. **Į grandinę įjungtas kondensatorius**



9.30a) pav. **Įkrova: Srovę rodo abu matuokliai, kai laisvasis laidas prijungiamas prie baterijos B ir uždaro grandinę. Abiejų matuoklių rodyklės staiga nukrypsta į vieną pusę ir tuoj pat grįžta prie nulio. Po to jokia srovė neteka. Kondensatorius „įkrautas“**



9.30b) pav. **Iškrova: Laidą perjungus iš taško B į tašką A, abu matuokliai rodo srovę, tik šį kartą jos kryptis priešinga. Ir vėl matuoklių rodmenys greitai krinta iki nulio. Dabar kondensatorius „iškrautas“**

Talpa

Visiškai įkrovus potencialų skirtumas tarp kondensatoriaus elektrodų yra toks pats, kaip ir tarp baterijos gnybtų.

Taigi didžiausias krūvio kiekis, kurį kondensatorius gali sukaupti, proporcingas baterijos įtampai:

$$Q \sim V,$$

kur Q yra elektroduose sukauptas krūvis, matuojamas kulonais, o V yra kondensatoriaus įtampa.

Santykis Q/V yra pastovus ir yra kondensatoriuje, sukaupto krūvio, tenkančio vienam voltui, matas. Tai vadinama **talpa** – jos simbolis C – ir yra nekintamas bet kuriam konkrečiam kondensatoriui. Tai yra,

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Talpa C matuojama **faradais,** ir vienas faradas – tai vienas kulonas voltui:

$$1\ \mathrm{F} = 1\ \mathrm{C} \cdot \mathrm{V}^{-1}$$

Būkite atidūs – pasvirusia C žymima talpa, o stačioji C yra kulono vieneto simbolis.

Vieno farado (1 F) talpa yra labai didelė, praktikoje naudojami daug mažesnių verčių kondensatoriai; jų talpa matuojama mikrofaradais (μF), nanofaradais (nF) ir pikofaradais (pF):

$1\ \mathrm{F} = 1\,000\,000\ \mu\mathrm{F} = 10^6\ \mu\mathrm{F}$

taigi $1\ \mu\mathrm{F} = 10^{-6}\ \mathrm{F}$

$1\ \mu\mathrm{F} = 1000\ \mathrm{nF} = 10^3\ \mathrm{nF}$

Taip pat $1\ \mu\mathrm{F} = 1\,000\,000\ \mathrm{pF}$ arba $10^6\ \mathrm{pF}$

Taigi $1\ \mathrm{pF} = 10^{-12}\ \mathrm{F}$

Darbinė įtampa

Jei kondensatoriaus įtampa yra per didelė, izoliatorius tarp elektrodų nesugeba izoliuoti, ir krūvis prasiskverbia tarp kondensatoriaus elektrodų. Dėl to ant kondensatorių žymima jų darbinė įtampa, – maksimali įtampa, kuri gali būti jungiama prie kondensatoriaus. Geriausia laikytis tokios taisyklės: užtikrinti, kad potencialų skirtumas tarp kondensatoriaus gnybtų niekada nebūtų daugiau kaip maždaug du trečdaliai darbinės įtampos, ypač kintamosios srovės grandinėse. (Smulkesnį aukščiausių ir efektinių įtampų aprašymą žiūrėkite 13 skyriuje, kad suprastumėte, kodėl taip yra.)

Nuosekliai ir lygiagrečiai jungiami kondensatoriai

Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių bendra talpa gali būti randama sudedant atskiras talpas:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

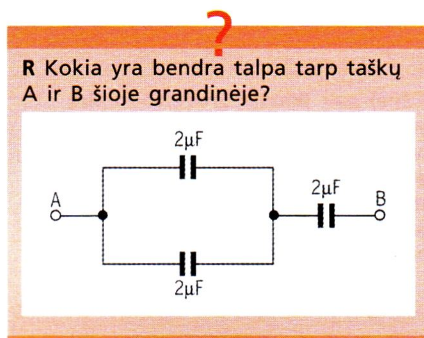
Taigi, didėjant lygiagrečiai sujungtų kondensatorių skaičiui, bendra jų talpa taip pat didėja.

Kai kondensatoriai yra sujungti nuosekliai, ekvivalenčiąją talpą galima rasti iš lygties

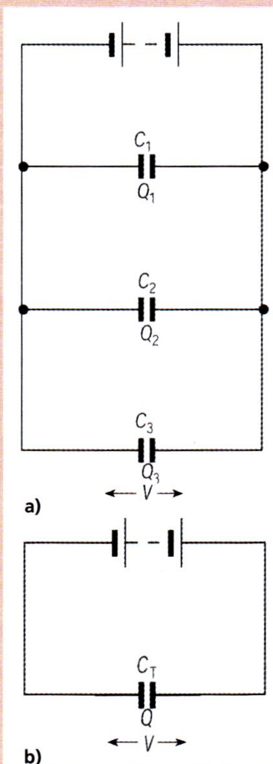
$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Tai reiškia, kad sujungus kondensatorius nuosekliai, bendra talpa sumažėja. (Pažvelkite į skirtumą tarp šių lygčių ir lygčių rezistoriams, pateiktų šiame skyriuje anksčiau.)

R Kokia yra bendra talpa tarp taškų A ir B šioje grandinėje?



Lygiagrečiai sujungti kondensatoriai



9.31a) pav. atvaizduoti trys talpų C_1, C_2 ir C_3 kondensatoriai, sujungti lygiagrečiai su baterija. Potencialų skirtumas kiekvieno kondensatoriaus gnybtuose yra tas pats: pavadinkime jį V. Kondensatorių krūviai atitinkamai Q_1, Q_2 ir Q_3. Bendras jų visų krūvis bus

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

9.31b) pav. tie trys kondensatoriai pakeisti vienu, C_T vertės, kuriame sukauptas tas pats krūvis Q, kai prie jo gnybtų prijungta V voltų. Todėl, kadangi $Q = CV$,

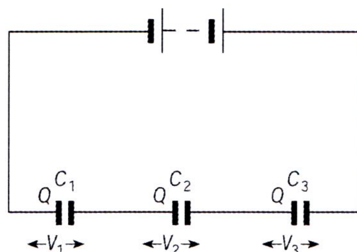
$$C_T V = C_1 V + C_2 V + C_3 V$$

Potencialų skirtumas visų kondensatorių gnybtuose yra tas pats, ir jį galima suprastinti:

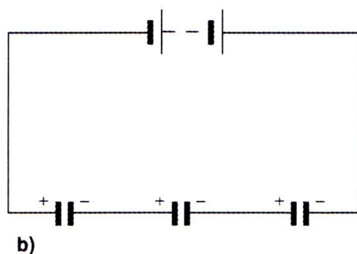
$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

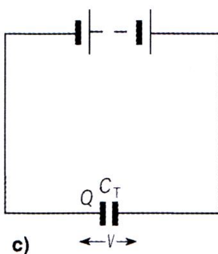
9.31 pav. Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių įtampos matavimas

Nuosekliai sujungti kondensatoriai



9.32 pav. **Nuosekliai sujungtų kondensatorių įtampos matavimas**





9.32 pav. atvaizduoti trys talpų C_1, C_2 ir C_3 kondensatoriai, sujungti nuosekliai su baterija. Jiems įsikraunant, bet kuriuo metu srovė grandinėje visada ta pati visuose grandinės taškuose, ir prireiks tiek pat laiko kiekvienam kondensatoriui įsikrauti. Tai reiškia, kad krūvis visuose kondensatoriuose bus toks pats, – pavadinkime jį Q_C.

Kadangi krūvis paprastai nepraeina tarp kondensatoriaus elektrodų, galite pasidomėti, kaip įsikrauna vidurinis kondensatorius. Elektronai palieka kondensatoriaus 1 kairįjį elektrodą. Tai „indukuoja" elektronų judėjimą iš kondensatoriaus 2 kairiojo elektrodo link dešiniojo kondensatoriaus 1 elektrodo. Tai savo ruožtu indukuoja elektronų srautą iš kairiojo kondensatoriaus 3 elektrodo link dešiniojo kondensatoriaus 2 elektrodo. Elektronai juda link dešiniojo kondensatoriaus elektrodo, užbaigdami šį procesą. Pabaigos rezultatas – kiekvienas kairysis elektrodas įkraunamas teigiamai, o kiekvienas dešinysis elektrodas įkraunamas neigiamai.

Potencialų skirtumai kiekvieno kondensatoriaus gnybtuose bus atitinkamai V_1, V_2 ir V_3. Tarkime, pakeičiame tuos tris kondensatorius vienu, C_T dydžio, kurio krūvis Q tas pats, o potencialų skirtumas V. Tada šis potencialų skirtumas V bus lygus potencialų skirtumų šių trijų kondensatorių gnybtuose sumai:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Taip pat $$V = \frac{Q}{C}$$

Todėl $$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

Krūvį Q galima suprastinti:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

?

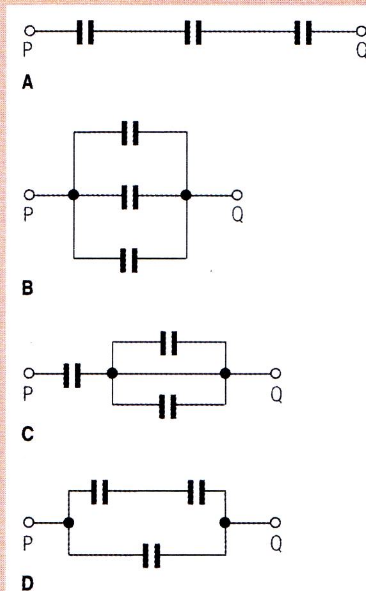
S Turime kelis kondensatorius, pažymėtus „5,0 μF, 12 V". Ką tai reiškia? Nusakykite, kaip juos sujungti, sudarant tokias talpas:

a) 2,5 μF talpą esant 24 V darbinei įtampai.

b) 5,0 μF talpą esant 24 V darbinei įtampai.

?

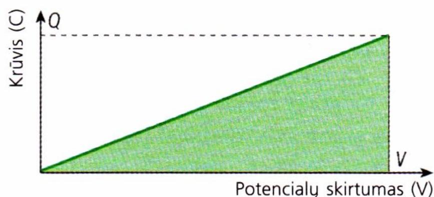
T Grandinėje atvaizduotos trijų 1 μF kondensatorių keturios schemos, nuo A iki D.



Kurios schemos

a) mažiausia talpa?

b) didžiausia talpa?



9.33 pav. **Krūvio kondensatoriuje priklausomybės nuo įtampos grafikas**

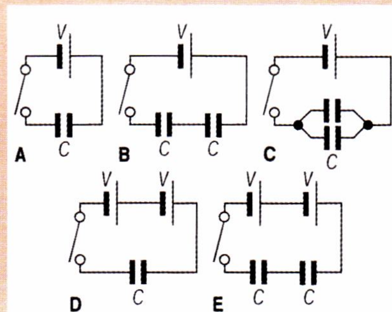
Žr. 7 klausimą. ■

Palyginkite energijos, sukauptos kondensatoriuje, lygtį su lygtimi energijos, sukauptos spyruoklėje, aprašomoje Huko dėsniu:

$$E = \tfrac{1}{2}Fx = \tfrac{1}{2}kx^2,$$

kur x = spyruoklės pailgėjimas, išreikštas metrais, sukeliamas jėgos F, niutonais, o k = spyruoklės jėgos konstanta.

U Baterijos pavaizduotose grandinėse visos tokios pat ir visi kondensatoriai yra identiški. Kurioje grandinėje sukauptas didžiausias energijos kiekis, kai visi kondensatoriai visiškai įkraunami?



V Kai kuriuose nešiojamuose kompiuteriuose kondensatoriai naudojami kaip trumpalaikis papildomas šaltinis. Grandinės sujungiamos taip, kad kondensatoriaus iškrovos srovė pastovi. 4 F kondensatorius, įkrautas iki 5 V, turi tiekti 50 μA atminties plokštei. Kaip ilgai jis galės tai daryti?

Žr. klausimus nuo 8 iki 12. ■

Kondensatoriuje sukaupta energija

Norint jau įkrautą kondensatorių dar papildyti krūviu, reikės atlikti darbą, įveikiant stūmos jėgas tarp krūvių. Jei kondensatoriaus potencialų skirtumas yra V voltų, – tai yra džaulių, tenkančių kulonui, matas, – tai krūviui Q (matuojamam kulonais, C) pridėti reikės energijos kiekio džauliais, gaunamo iš

energija = džauliai/kulonui × kulonai

$$E = V \times Q$$

Krūvis kondensatoriuje proporcingas prie jo prijungtai įtampai, taigi įtampos priklausomybės nuo krūvio grafikas yra tiesi linija, einanti per koordinačių pradžią, kaip pavaizduota 9.33 pav. Tai reiškia, kad tuo pačiu krūvio kiekiu papildant kondensatorių, reikia atlikti didesnį darbą. Visą darbą, atliktą įkraunant kondensatorių nuo 0 V, rodo nuspalvintas plotas po grafiku. Tai yra ir energija (džauliais), sukaupta kondensatoriuje:

$$\text{plotas} = \tfrac{1}{2}QV$$

Bet iš talpos lygties: $Q = CV$

Taigi: **Sukaupta energija** $= \tfrac{1}{2}QV = \tfrac{1}{2}CV^2$

Kondensatoriai ir rezistoriai

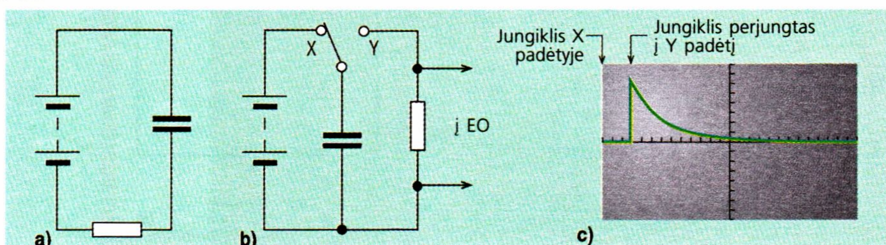
Nuosekliai su kondensatoriumi įjungus rezistorių, kaip 9.34a) pav., kondensatoriaus įkrovos ir iškrovos trukmė padidėja, kadangi srovė grandinėje sumažėja. Grandinėje 9.34b) pav. įjungtas osciloskopas (EO – elektroninis osciloskopas) rodo, kaip potencialų skirtumas tarp rezistoriaus gnybtų kinta išsikraunant kondensatoriui. Potencialų skirtumas tarp rezistoriaus gnybtų proporcingas juo tekančiai srovei, taigi pėdsakas osciloskope rodo, kaip kinta srovė grandinėje.

Ta kreivė yra *eksponentiško* slopimo kreivė. Ji turi įdomią savybę: srovė grandinėje slopsta tuo pačiu santykiu kiekviename paskesniame laiko tarpsnyje. Panaši kreivė gamtoje dažnai pasibaigia. Jūs galbūt pažįstate ją iš radioaktyviojo skilimo kreivės. Pastovus santykis, matuojamas pastaruoju atveju, vadinamas **pusėjimo trukme,** – tai yra laikas, kuris trunka, kol radioaktyviojo šaltinio aktyvumas sumažėja perpus. 9.34c) pav. atveju tiek rezistoriaus varža, tiek kondensatoriaus talpa lemia iškrovos spartą. Tai matyti iš varžos ir talpos vienetų:

$$R \times C = \frac{\text{voltai}}{\text{amperai}} \times \frac{\text{kulonai}}{\text{voltai}}$$

$$= \frac{\text{kulonai}}{\text{kulonai/sekundės}} = \text{sekundės}$$

Sandauga RC vadinama **laiko konstanta** ir ja remiamasi matuojant srovės slopimo spartą kondensatoriuje.



9.34 pav. a) **Rezistorius ir kondensatorius, sujungti nuosekliai.** b) **Kai jungiklis X padėtyje, kondensatorius įsikrauna. Kai jungiklis Y padėtyje, kondensatorius išsikrauna ir palieka elektroniniame osciloskope pėdsaką, pavaizduotą** c)

Kondensatoriaus eksponentiško slopimo matematinė išraiška

Įsivaizduokite C faradų kondensatorių, kuris iš pradžių įkrautas iki V voltų potencialų skirtumo, o po to iškraunamas pro R omų rezistorių. Nors ir žinome, kad srovė slopsta, sutarsime, kad vidutinė srovė per mažą laiko tarpsnį, Δt, yra I amperų. Krūvio kiekis ΔQ, srūvantis per šį laiką, bus: $\Delta Q = -I\Delta t$.

Srovė taip pat gali būti nusakoma varža ir potencialų skirtumu rezistoriaus gnybtuose – pagal Omo dėsnį ($V = IR$), taigi

$$\Delta Q = -\frac{V}{R}\Delta t$$

Potencialų skirtumas yra susijęs ir su krūviu kondensatoriuje, pagal $CV = Q$, taigi

$$\Delta Q = -\frac{Q}{RC}\Delta t$$

Galima užrašyti lygtį kitaip:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{Q}{RC}$$

Jei Δt yra labai mažas, tai jis užrašomas kaip $\mathrm{d}t$, ir lygtis tampa šitokia:

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = -\frac{Q}{RC}$$

arba
$$\frac{1}{Q}\mathrm{d}Q = -\frac{1}{RC}\mathrm{d}t$$

Tai yra pirmosios eilės diferencialinė lygtis. Kad ją išspręstume, turime integruoti abi puses:

$$\int_{Q_0}^{Q}\frac{1}{Q}\mathrm{d}Q = -\int_0^t\frac{1}{RC}\mathrm{d}t$$

arba
$$\ln\left(\frac{Q}{Q_0}\right) = -\frac{t}{RC}$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

$$Q = Q_0\ \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

Krūvio Q priklausomybės nuo laiko t grafikas yra eksponentiško slopimo kreivė. Slopimo sparta, arba kreivės nuolydis, priklauso nuo pradinio krūvio Q_0 ir nuo R bei C verčių. Tai atvaizduota 9.35 pav. Jei laiką t lygtyje pakeistume RC, tai Q bus krūvis po RC sekundžių:

$$Q = Q_0\ \exp\left(-\frac{RC}{RC}\right) = Q_0 \exp(-1)$$

Taigi
$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{1}{\mathrm{e}} = \frac{1}{2{,}718} = 0{,}37$$

Tai reiškia, kad per RC sekundžių krūvis kondensatoriuje sumažėja iki 37 pradinės vertės procentų.

Eksponentiško kitimo bandymas pirmuoju metodu

Jei dydis mažėja eksponentiškai, tai per lygius laiko tarpsnius yra *pastovus santykis* tarp pradžios ir pabaigos verčių. Pavyzdžiui, jei užrašysime dydį x lygiais tarpsniais, tai jo vertės (x_1, x_2, x_3, x_4, ...) turės vienodą tarpusavio santykį ($x_1/x_2 = x_2/x_3 = x_3/x_4 = \ldots$).

Eksponentiško kitimo bandymas antruoju metodu

Naudodamiesi anksčiau išvesta lygtimi:

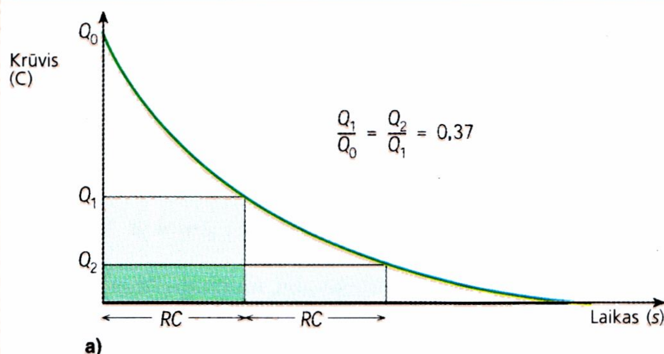
$$\left(\frac{Q}{Q_0}\right) = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

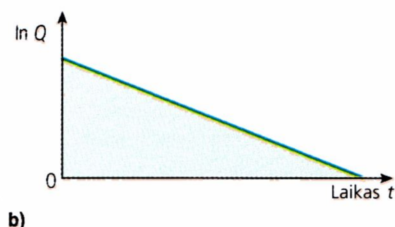
Logaritmuodami abi puses gauname:

$$\ln\left(\frac{Q}{Q_0}\right) = -\frac{t}{RC}$$

arba
$$\ln Q - \ln Q_0 = -\frac{t}{RC}$$

Dėl to ln Q priklausomybės nuo laiko t grafikas bus tiesė, – tai eksponentiško kitimo laike požymis. Grafiko nuolydis bus $-1/RC$.





9.35 pav. a) **Kondensatoriaus iškrovos eksponentiško slopimo kreivė.** b) **ln *Q* priklausomybė nuo laiko**

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėjote sužinoti ir suprasti štai ką:

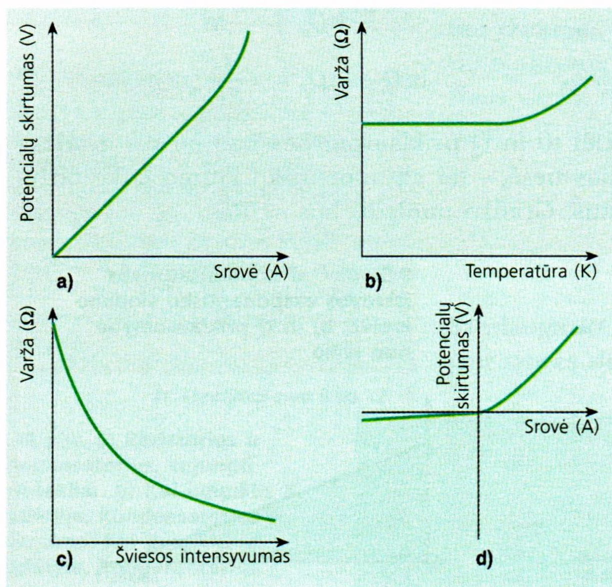
- Elektros srovė yra elektros krūvio srautas ir gali būti aprašyta lygtimis:
  $I = dQ/dt$ ir $I = nAQv$.
- Kai krūvis srūva grandine, perduodama energija. Potencialų skirtumas yra energija, perduota vieno kulono, krūviui srūvant elementu ar prietaisu. Tai gali būti išreikšta šitaip: 1 voltas = 1 džaulis/kulonas.
- Srovės grandinėje stiprumas priklauso nuo grandinės varžos.
- Varža $R = \rho l/A$, kur ρ yra savitoji varža, būdinga kiekvienai medžiagai.
- Omo dėsnis teigia, kad varža = potencialų skirtumas/srovė.
- Galia grandinėje
  $P = IV = I^2R = V^2/R$.
- Elektrovara yra energija, atiduodama srovės šaltinio vieno kulono krūviui. Dalis energijos panaudojama atlikti darbui prieš vidinę maitinimo šaltinio varžą.
- Potencialo dalikliai ir potenciometrai gali būti naudojami įtampai grandinėse valdyti.
- Laisvųjų elektronų skaičius lemia, ar medžiagos yra laidininkai, puslaidininkiai, ar izoliatoriai. Esant žemoms temperatūroms, kai kurios medžiagos tampa superlaidininkais.
- Kondensatoriai sukaupia krūvį Q, tarp jų gnybtų esant potencialų skirtumui V. Kondensatoriaus talpa C gaunama iš lygties $Q = CV$.
- Kondensatoriuose gali būti kaupiama energija. Sukaupta energija $E = ½QV = ½CV^2$.
- Kondensatoriaus įkrovos ar iškrovos sparta priklauso nuo laiko konstantos RC.
- Krūvio kondensatoriuose slopimas yra eksponentiškas.

KLAUSIMAI

1 9.K1 pav. diagramose atvaizduotos keleto naudingų elektroninių prietaisų charakteristikos.

a) Nusakykite, kaip kinta kiekvieno jų varža.

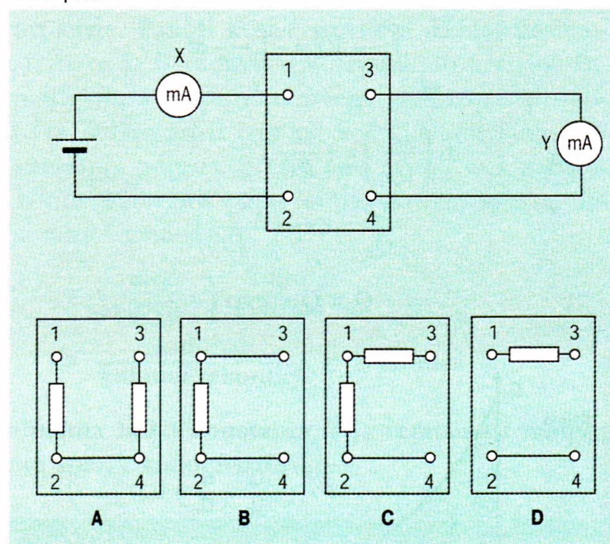
b) Grafikai iliustruoja šių elementų elgseną: diodo, fotorezistoriaus, termistoriaus, varinio laido. Skirkite į porą kiekvienam grafikui po vieną iš tų komponentų.



9.K1 pav.

2 Dėžutė, turinti keturis gnybtus, išbandoma naudojant grandinę 9.K2 pav. Žemiau atvaizduoti keturi skirtingi rėmeliai, nuo A iki D. Kiekviename jų panaudoti rezistoriai yra identiški.

9.K2 pav.



a) Kurioje grandinėje rodytų matuoklis X, o matuoklis Y nerodytų?

b) Kurioje grandinėje abu miliampermetrai rodytų tą patį?

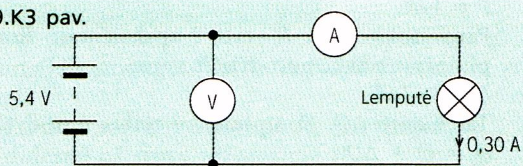
c) Kurioje grandinėje matuoklio X rodmenys būtų dvigubai didesni nei matuoklio Y?

3 9.K3 pav. atvaizduotoje grandinėje baterijos elektrovara 5,4 V. Lemputėje teka 0,30 A srovė. Voltmetras rodo 4,8 V.

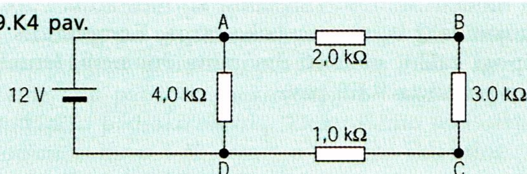
a) Paaiškinkite, kodėl voltmetro rodmuo mažesnis už elektrovarą.

b) Pasinaudokite suteikta informacija ir apskaičiuokite baterijos vidinę varžą.

c) Apskaičiuokite energiją, perduotą per sekundę lemputėje.



4 12 V be galo mažos vidinės varžos baterija prijungta prie AD 9.K4 pav.



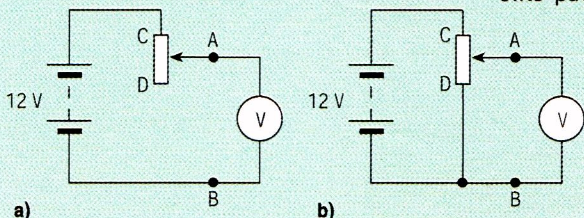
a) Apskaičiuokite potencialų skirtumo tarp gnybtų BC vertę.

b) **(i)** Kalibruotas osciloskopas, naudojamas kaip labai didelės varžos voltmetras, prijungtas tarp BC. Kodėl galima tikėtis, kad jis rodys tą patį potencialų skirtumą, kaip ir jūsų atsakyme į **a)**?

(ii) Osciloskopas pakeičiamas 6,0 kΩ varžos voltmetru su judama rite. Apskaičiuokite, ką šis voltmetras rodytų.

c) Dabar voltmetro su judama rite rodmenų tikslumui patikrinti lygiagrečiai jam papildomai įjungiamas osciloskopas. Tarę, kad jie abu yra tiksliai kalibruoti, konstatuokite osciloskopo ir voltmetro rodmenis.

5 Moksleivė norėjo įžiebti lemputę, ant kurios nurodyta 3 V, 0,2 A, tačiau turėjo tik be galo mažos varžos 12 V bateriją. Kad sumažintų baterijos įtampą, ji sujungė grandinę, parodytą 9.K5a) pav. Ji įjungė voltmetrą taip, kad galėtų patikrinti įtampą prieš prijungdama lemputę. Maksimali reostato CD varžos vertė 1000 Ω.



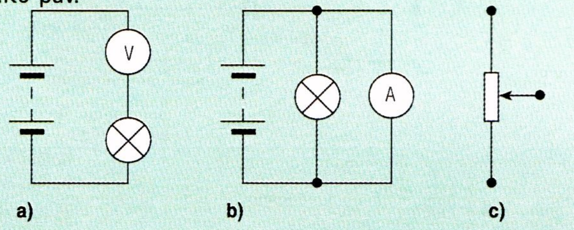
a) Ji nustatė, kad reostato slankiklį pastūmus žemyn nuo C iki D, voltmetro rodmuo sumažėjo nuo 12 V iki 11 V. Kokia voltmetro varža?

b) Ji pakeitė šią grandinę, kaip parodyta 9.K5b) pav., naudodama reostatą kaip potenciometrą, ir tada sugebėjo nustatyti reostato slankiklį taip, kad gautų matuoklio rodmenį 3 V. Kokia srovė dabar tekėtų voltmetru?

c) Laikant šią srovę be galo maža palyginti su reostatu tekančia srove, kiek žemyn nuo C buvo pastūmėtas reostato slankiklis?

d) Tada moksleivė vietoj voltmetro įjungė lemputę, bet toji neįsižiebė. Kaip šitai paaiškintumėte? (Pati lemputė buvo visiškai gera.)

6 9.K6a) ir b) pav. atvaizduoti matuokliai, kurie buvo neteisingai įjungti į grandines su baterija (elektrovara 3 V, vidinė varža 1 Ω) ir lempute (3 V, 0,2 A). Voltmetro ribos yra 0–3 V, ir varža 30 kΩ. Ampermetro ribos yra 0–3 A, ir varža 0,1 Ω.



Pasinaudoję pateikta informacija, atsakykite į tokius klausimus. Pateikite savo samprotavimus kiekvienu atveju. (Tikslūs matuoklių rodmenų skaičiavimai nėra būtini.)

a) **(i)** Ar įsižiebtų lemputė 9.K6a) pav.?

(ii) Ar voltmetro rodmenys būtų artimi nuliui, apie skalės vidurį, ar prie skalės pabaigos?

b) **(i)** Ar įsižiebtų lemputė 9.K6b) pav.?

(ii) Ar ampermetro rodmenys būtų artimi nuliui, apie skalės vidurį, ar prie skalės pabaigos?

Lemputės srovės priklausomybės nuo įtampos grafikui nubraižyti intervale nuo nulio iki maždaug 2,5 V pateikiami visi pradiniai duomenys; naudojamas 10 Ω trijų gnybtų kintamasis rezistorius, parodytas 9.K6c) pav.

Užbaikite grandinės reikalingiems rodmenims gauti brėžinį, naudodami elementus 9.K6a)–c) pav.

7 Fotoaparato blykstės mazgas naudoja 5000 μF talpos kondensatorių, kuris įkraunamas iki 20 V. Kondensatorius išsikrauna per blykstės lemputę per 1 ms (1×10^{-3} s).

a) Kiek energijos sukaupta kondensatoriuje?

b) Kokia yra blykstės lemputės vardinė galia?

c) Įvertinkite vidutinę srovę, kuri teka išsikraunant kondensatoriui.

8 Teoriniam kondensatoriaus 9.K8 pav. iškrovos grafikui nubraižyti gali būti panaudota lygtis $\Delta Q = (Q/RC)\Delta T$. Tarkime, kad kondensatoriaus talpa yra 500 µF, rezistoriaus varža – 100 Ωk, ir kad įkrovos potencialų skirtumas – 10 V.

a) Kiek krūvio bus sukaupta kondensatoriuje, visiškai jį įkrovus?

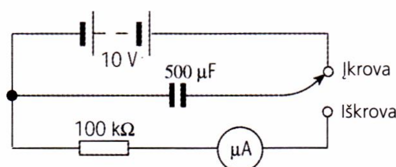
b) Parinkę ΔT lygų 5 s, apskaičiuokite $\Delta T/RC$ ir krūvį ΔQ, kurio netenka kondensatorius per šį laiką.

c) Kokia krūvio dalis liks kondensatoriuje po pirmųjų 5 s?

d) Kokios krūvio dalies neteks kondensatorius per kitas 5 s? Kiek krūvio bus likę po šio laiko?

e) Kartokite **d)** dalį 5 s intervalais 2 × RC sekundžių.

f) Panaudokite gautuosius rezultatus krūvio priklausomybės nuo laiko grafikui nubraižyti. Patikrinkite ar grafike išlaikytas pastovus santykis.



9.K8 pav.

9 8 klausimu sužinojote apie metodą likusiam kondensatoriuje krūviui apskaičiuoti tam tikrais tarpsniais. Tas procesas yra kartotinis ir veikiausiai nusibosta atlikus keletą tuzinų skaičiavimų, bet kaip tik tokį darbą gerai atlieka kompiuteriai. Galėtų būti parašytas paprastas kompiuterinis kondensatoriaus iškrovos modelis šioms operacijoms cikliškai atlikti:

1) $Q = CV$.
Apskaičiuokite Q iš V ir C verčių. Kompiuteriui reikėtų pateikti pradinę V vertę ir C didumą.

2) $I = V/R$.
Panaudokite Q ir R vertę I apskaičiuoti. Kompiuteriui reikia nurodyti R vertę.

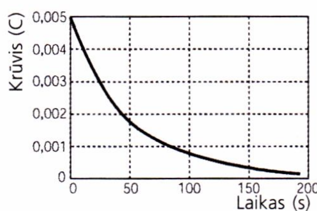
3) $\Delta Q = -I\Delta T$.
Tai sudaro ΔQ. Kompiuteriui reikia nurodyti ΔT.

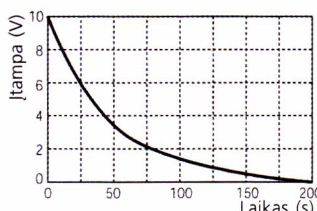
4) $Q = Q + \Delta Q$
Naujoji Q vertė = senoji Q vertė plius ΔQ

5) $T = T + \Delta T$
Pradėkite pateikdami vertę $T = 0$. Tada grįžkite prie 1 žingsnio ir pakartokite kiekvieną žingsnį.

Šis modelis nurodo žingsnius, kuriuos atlikus apskaičiuojamos Q vertės per laiko tarpą. Kompiuteris taipogi galėtų sudaryti dinaminę duomenų lentelę, kaip parodyta 9.K9 pav.

Kondensatoriaus iškrova			**Galite keisti vertes šioje dalyje**		
	Duomenys	Nuoseklioji varža, *R* =	100000	omų	
		Talpa, *C* =	0,0005	F	
		Šaltinio įtampa, *V* =	10	voltų	
		Laiko tarpsnis, *dt* =	0,5	sekundžių	
		Krūvis kondensatoriuje, *Q* = *CV*	0,005	kulonų	
	Formulės	Srovė *I* = *V*/*R*			
		Krūvio pokytis dQ = –*I*dt			
		Dabartinis krūvis = buvęs krūvis + pokytis	Q=Q+dQ		
		Įtampa kondensatoriaus C gnybtuose	= *Q*/*C*		
Laikas, *t*	Krūvis *Q*	Krūvio pokytis, *dQ*	Srovė pro *R*, *I*	Įtampa kondensatoriaus C gnybtuose	
0	0,005000	–0,00005000	0,000100	10,00	
0,5	0,004950	–0,00004950	0,000099	9,90	
1	0,004901	–0,00004901	0,000098	9,80	
1,5	0,004851	–0,00004851	0,000097	9,70	
2	0,004803	–0,00004803	0,000096	9,61	
2,5	0,004755	–0,00004755	0,000095	9,51	
3	0,0047			9,41	
3,5	0,0046			9,32	
4	0,0046			9,23	
4,5	0,0045			9,14	
5	0,0045			9,04	
5,5	0,0044			8,95	
6	0,0044			8,86	
6,5	0,0043			8,78	
7	0,0043			8,69	
7,5	0,004300	–0,00004300	0,000086	8,60	
8	0,0042		5	8,51	
8,5	0,0042		4	8,43	
9	0,0041		3	8,35	
9,5	0,0041		3	8,26	
10	0,0040		2	8,18	
10,5	0,0040		1	8,10	
11	0,0040		0	8,02	
11,5	0,0039		9	7,94	
12	0,003		9	7,86	
12,5	0,003		8	7,78	
13	0,003		7	7,70	



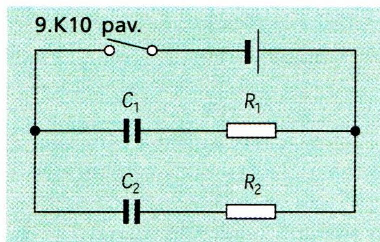


9.K9 pav.

Pasinaudokite dinamine lentele ir gaukite pakankamai duomenų, reikalingų nubraižyti krūvio priklausomybės nuo laiko grafiką maždaug 3 × RC laikotarpiui.

Pakeitus pradines R ir C vertes gali būti ištirtas tikslus slopimo kreivės pobūdis.

10 9.K10 pav. atvaizduotoje grandinėje abu kondensatoriai iš pradžių yra neįkrauti. Imkite $R_2 = 2R_1$ ir $C_2 = 2C_1$.



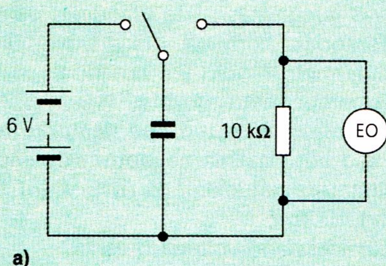
Kai jungiklis sujungtas, kurie iš pateiktų teiginių yra teisingi?

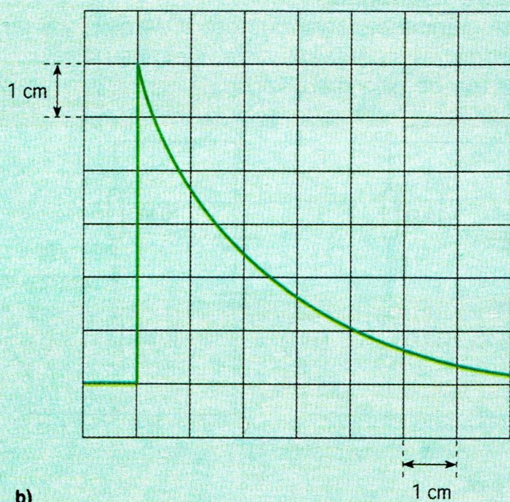
a) Pradinė srovė rezistoriuje R_1 yra dvigubai didesnė už srovę rezistoriuje R_2.

b) Galutinis potencialų skirtumas abiejų kondensatorių gnybtuose bus vienodas.

c) Visiškai įkrovus, abu kondensatoriai turės vienodą krūvį.

11 Kondensatorius įkraunamas iš 6 V nuolatinės srovės šaltinio, po to iškraunamas pro 10 kΩ rezistorių, panaudojant grandinę, pavaizduotą 9.K11 pav. Diagrama taip pat rodo elektroniniame osciloskope atsirandančio pėdsako vaizdą. Elektroninio osciloskopo jautrumas buvo 1 V · cm^{-1}, o jo laiko skleistinė buvo nustatyta ties 0,1 s · cm^{-1} verte.





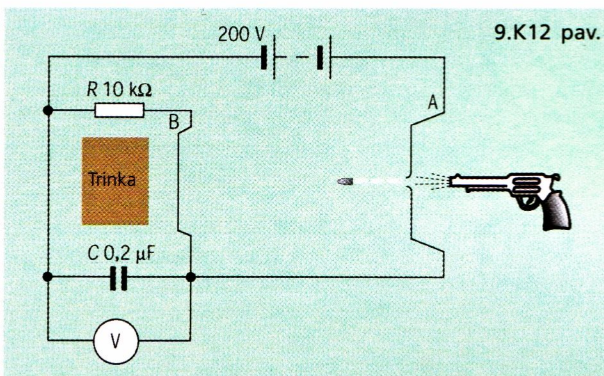
a) Pateikite pradinės iškrovos srovės vertės skaičiavimus.

b) **(i)** Pasinaudokite pėdsako elektroniniame osciloskope atvaizdu ir įvertinkite krūvio, pratekėjusio pro rezistorių per vieną iškrovą, vertę.

(ii) Iš gautų duomenų apskaičiuokite talpos vertę.

c) Šis kondensatorius pakeičiamas kitu, dvigubai mažesnės talpos. Nubrėžkite ir pažymėkite pėdsaką, atsirasiantį dabar.

12 Bandyme revolverio kulkos greičiui matuoti sudaroma 9.K12 pav. grandinė taip, kad kai iššaunama iš revolverio, kulka pirmiausia nutraukia laidininką A, po to – laidininką B, 0,02 m už A, iki įstringa trinkoje už B.



Prieš iššaunant iš revolverio, voltmetro, kurio varža daug didesnė už vektoriaus R varžą, rodmuo yra 200 V. Po šūvio paaiškėja, kad voltmetro rodmuo yra sumažėjęs iki 150 V.

a) Kokia srovė teka per rezistorių R tą akimirką, kai kulka nutraukia pirmąjį laidininką A? Pagrįskite savo atsakymą.

b) Papasakokite, kas atsitinka srovei per rezistorių R, kol kulka lekia nuo A iki B ir vėliau nutraukia laidininką B. Pagrįskite savo atsakymą.

c) Kiek krūvio netenka kondensatorius, kol kulka lekia nuo A iki B?

d) Apskaičiuokite apytikslį laiką, per kurį kulka nulekia nuo A iki B. Pagrįskite savo atsakymą.

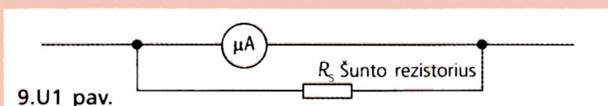
Užduotis

ELEKTRINIAI MATAVIMAI

Gali prireikti įjungti į grandinę matavimo prietaisus tokiems dydžiams kaip srovė ar potencialų skirtumas išmatuoti. Elektriniai detektoriai taip pat naudingi daugybei aplinkos veiksnių matuoti, kūno funkcijoms stebėti ir inžinieriams padėti išmatuoti fizinius pokyčius.

Srovės matavimas

Tipiškas laboratorijos ampermetras iš tikrųjų yra mikroampermetras su judama rite, kuriuo galima matuoti sroves iki 100 μA. Maksimali srovė, kurią galima išmatuoti, yra matuoklio rodmuo iki skalės pabaigos. Ampermetru galima matuoti ir didesnes sroves, prijungus **šunto rezistorių.** Šunto rezistorius jungiamas lygiagrečiai matuokliui taip, kad didžioji srovės dalis nukreipiama į šuntą, aplenkiant matuoklį.



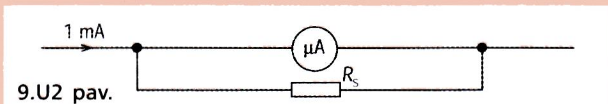
9.U1 pav.

1 9.U1 pav. įjungto ampermetro varža lygi 1000 Ω.

a) Koks yra potencialų skirtumas tarp mikroampermetro gnybtų, kai juo teka 100 μA srovė?

b) Koks yra potencialų skirtumas tarp šunto rezistoriaus gnybtų?

9.U2 pav. atvaizduotu matuokliu reikia matuoti maksimalią 1 mA srovę. Kitaip sakant, kai matuoklis įjungtas į grandinę, kuria teka 1 mA srovė, matuoklio rodmenys yra per visą skalę.



9.U2 pav.

c) Kokia bus tikroji srovė mikroampermetre?

d) Kokia tekės srovė šunto rezistoriuje?

e) Koks potencialų skirtumas tarp mikroampermetro gnybtų ir rezistoriuje?

f) Įsitikinkite, kad reikalinga šunto rezistoriaus varža 111,11 Ω.

g) Dabar matuoklis įjungtas į kitą grandinę ir rodo 5,6 mA srovę. Kokia srovė teka mikroampermetru?

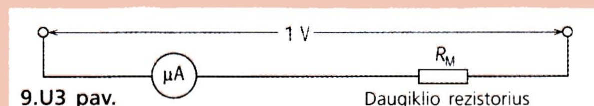
h) Apskaičiuokite šunto rezistorių varžas, reikalingas norint išmatuoti šitokias maksimalias sroves: **(i)** 100 mA, **(ii)** 1 A, **(iii)** 5 A, **(iv)** 10 A.

Voltmetrai

Atsakant į 1 klausimą mikroampermetras gali būti panaudotas kaip voltmetras. Prisiminkite, kad voltmetrai visada jungiami lygiagrečiai.

2 Kokia yra maksimali įtampa, kurią galima išmatuoti mikroampermetru, kuris naudojamas kaip voltmetras?

Aukštesnėms įtampoms matuoti nuosekliai su mikroampermetru jungiamas rezistorius, vadinamas **daugiklio rezistoriumi.** Reikalingas voltmetras įtampai iki 1 V matuoti, kaip pavaizduota 9.U3 pav. Kad būtų rodmenys per visą skalę, srovė mikroampermetre vėl turi būti 100 μA.



9.U3 pav.

3

a) Kokia srovė tekės daugiklio rezistoriuje?

b) Koks bus potencialų skirtumas tarp mikroampermetro gnybtų?

c) Koks bus potencialų skirtumas tarp daugiklio rezistoriaus gnybtų?

d) Įsitikinkite, kad daugiklio rezistoriaus dydis bus 9,0 kΩ.

e) Kokia yra voltmetro varža?

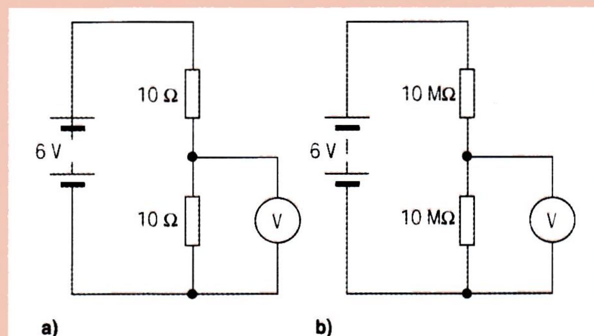
f) Voltmetras įjungiamas į kitą grandinės dalį ir rodo 0,4 V potencialų skirtumą. Kokia srovė teka mikroampermetru? Koks yra potencialų skirtumas tarp mikroampermetro gnybtų?

g) Apskaičiuokite, kokios turi būti daugiklio rezistorių varžos, kad būtų galima naudoti mikroampermetrą kaip voltmetrą, matuojantį iki **(i)** 5 V, **(ii)** 10 V, **(iii)** 50 V, **(iv)** 1000 V.

h) Kokia bus kiekvieno voltmetro varža?

Voltmetrų naudojimas

Dviejose grandinėse, atvaizduotose 9.U4 pav., yra tas pats voltmetras su 100 kΩ varža. Kiekvienu atveju baterija turi be galo mažą varžą.



9.U4 pav.

4

a) Koks yra potencialų skirtumas tarp kiekvieno 10 Ω rezistoriaus gnybtų 9.U4a) pav.?

b) Koks yra potencialų skirtumas tarp kiekvieno 1 MΩ rezistoriaus gnybtų 9.U4b) pav.?

c) Voltmetras, įjungtas prie vieno iš 10 Ω rezistorių 9.U4a) pav., rodo 3 V potencialų skirtumą. Prijungus jį prie vieno iš 1 MΩ rezistorių 9.U4b) pav., jis rodo apie 0,5 V potencialų skirtumą. Paaiškinkite, kodėl rodmenys skirtingi.

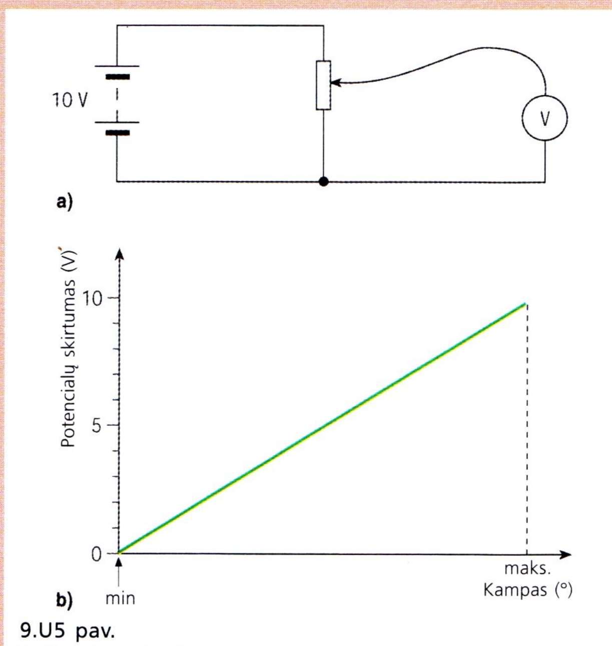
Elektrovaros matavimas

Neįmanoma išmatuoti elektrovaros be šiokios tokios paklaidos, tiesiog prijungus voltmetrą prie maitinimo šaltinio. Taip yra todėl, kad voltmetras vartoja truputį srovės, nors ir labai menkos, ir visada šiek tiek įtampos bus prarandama vidinėje maitinimo šaltinio varžoje. Jei panagrinėtume lygtį

$$\epsilon = V - IR,$$

tai paaiškėtų, kad matuojamoji įtampa yra lygi elektrovarai tik tada, kai srovė lygi nuliui.

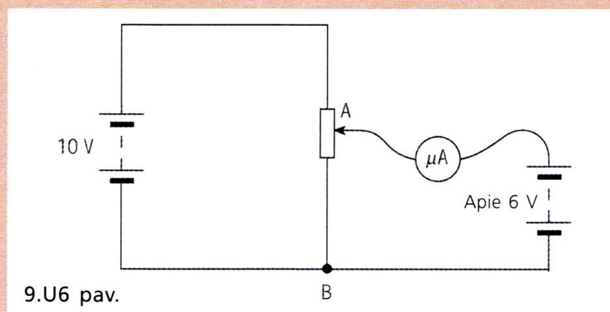
Potenciometras gali būti kalibruotas matuoti voltais. Jei panaudotas kintamasis rezistorius yra tiesinis, tai potenciometro pasukimo kampas bus proporcingas įtampai, kaip parodyta 9.U5b) pav. Prijungtas prie potenciometro didelės varžos voltmetras rodys, kad įtampa irgi proporcinga pasukimo kampui.



9.U5 pav.

Kintamojo rezistoriaus skalė taip pat galėtų būti kalibruota voltais.

9.U6 pav. parodytas potenciometras prijungtas prie kitos baterijos, kurios elektrovara yra maždaug 6 V. Į grandinę taip pat įjungtas jautrus su nuliu skalės centre mikroampermetras.



9.U6 pav.

5

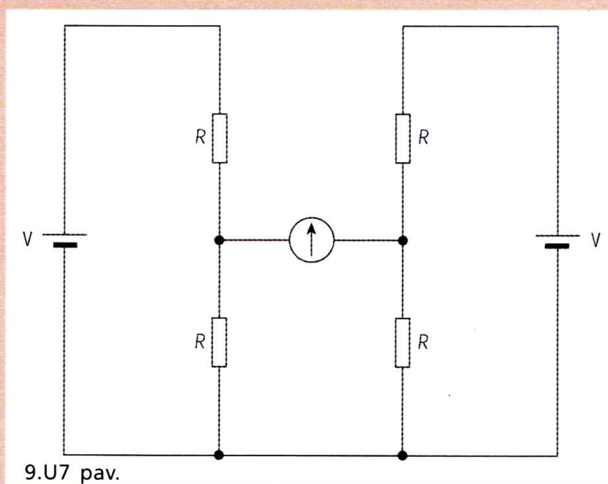
a) Potenciometras nustatytas taip, kad įtampa tarp A ir B yra apie 8 V. Kokia bus mikroampermetru tekančios srovės kryptis?

b) Potenciometras nustatytas taip, kad potencialų skirtumas tarp A ir B yra apie 4 V. Kokia dabar bus mikroampermetru tekančios srovės kryptis?

c) Potenciometras kruopščiai derinamas, kol mikroampermetro rodmuo tampa lygus nuliui. Potenciometras rodo, kad įtampa tarp A ir B yra 5,6 V. Kokia yra antrosios baterijos elektrovara? Paaiškinkite, kodėl šiomis sąlygomis srovė lygi nuliui.

6

a) Nubraižykite grandinę, kuria naudojantis galėtų būti išmatuota varža, įjungus į ją ampermetrą ir voltmetrą.

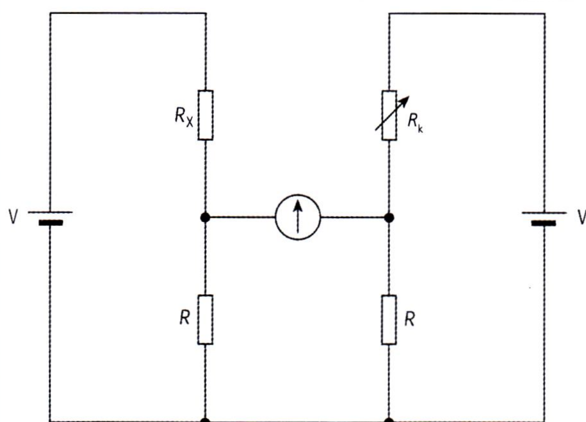


9.U7 pav.

9.U7 pav. grandinėje įjungti du potencialo dalikliai. Kiekviena baterija turi tokią pat elektrovarą ir vidinę varžą. Iš pradžių visos varžos yra lygios.

b) Koks bus matuoklio rodmuo? Kodėl?

Grandinė pakeičiama taip, kad nežinoma varža R_x pakeičia vieną rezistorių, ir kintamas rezistorius pakeičia kitą, kaip 9.U8 pav.

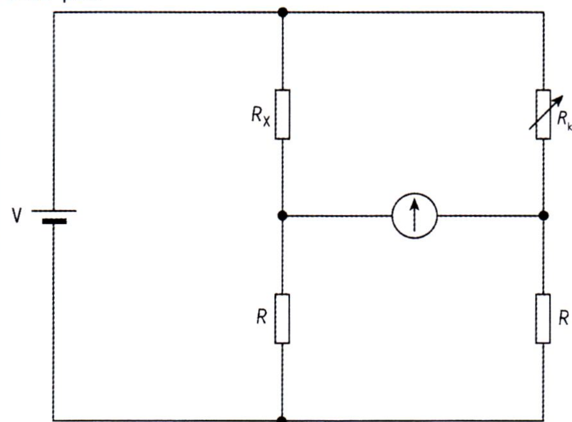


9.U8 pav.

c) Kokiomis sąlygomis matuoklio rodmuo dabar bus lygus nuliui?

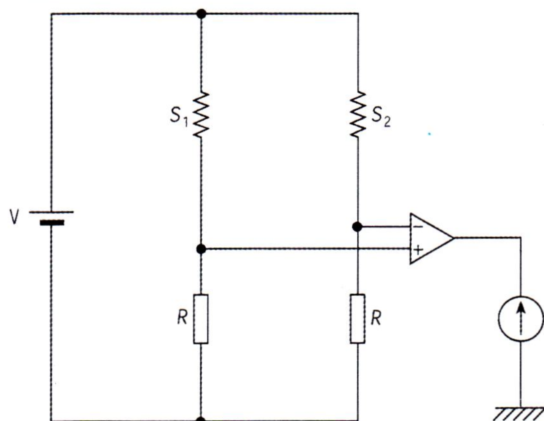
Kadangi abi baterijos yra identiškos, galime apsieiti tik su viena iš jų. Grandinė dabar tampa 9.U9 pav. grandine. Ši schema žinoma Vitstono tiltelio pavadinimu.

9.U9 pav.



Ši schema labai naudinga mažiems varžos pokyčiams nustatyti. Įtempimo matuokliai gali būti panaudoti aptikti jėgoms ir poslinkiams. Įtempimo matuoklis yra specialus rezistorius: jo varža pakinta, esant įtempimui.

Paprastai du identiški matuokliai naudojami tiltelyje; vienas yra veikiamas įtempimo, o kitas – ne. Įtempiamojo matuoklio varžos pokyčiai lyginami su kito, ir dėl to tiltelis išsibalansuoja. Nedidelis srovės pokytis naudojamas matuoti jėgai, sukeliančiai įtempimą. Dažnai srovės pokytis būna labai mažas. 9.U10 pav. tai sukels nedidelį įtampų tarp kiekvieno (*R* vertės) rezistoriaus gnybtų skirtumą, vadinasi, ir skirtumą tarp dviejų operacinio stiprintuvo įvadų.



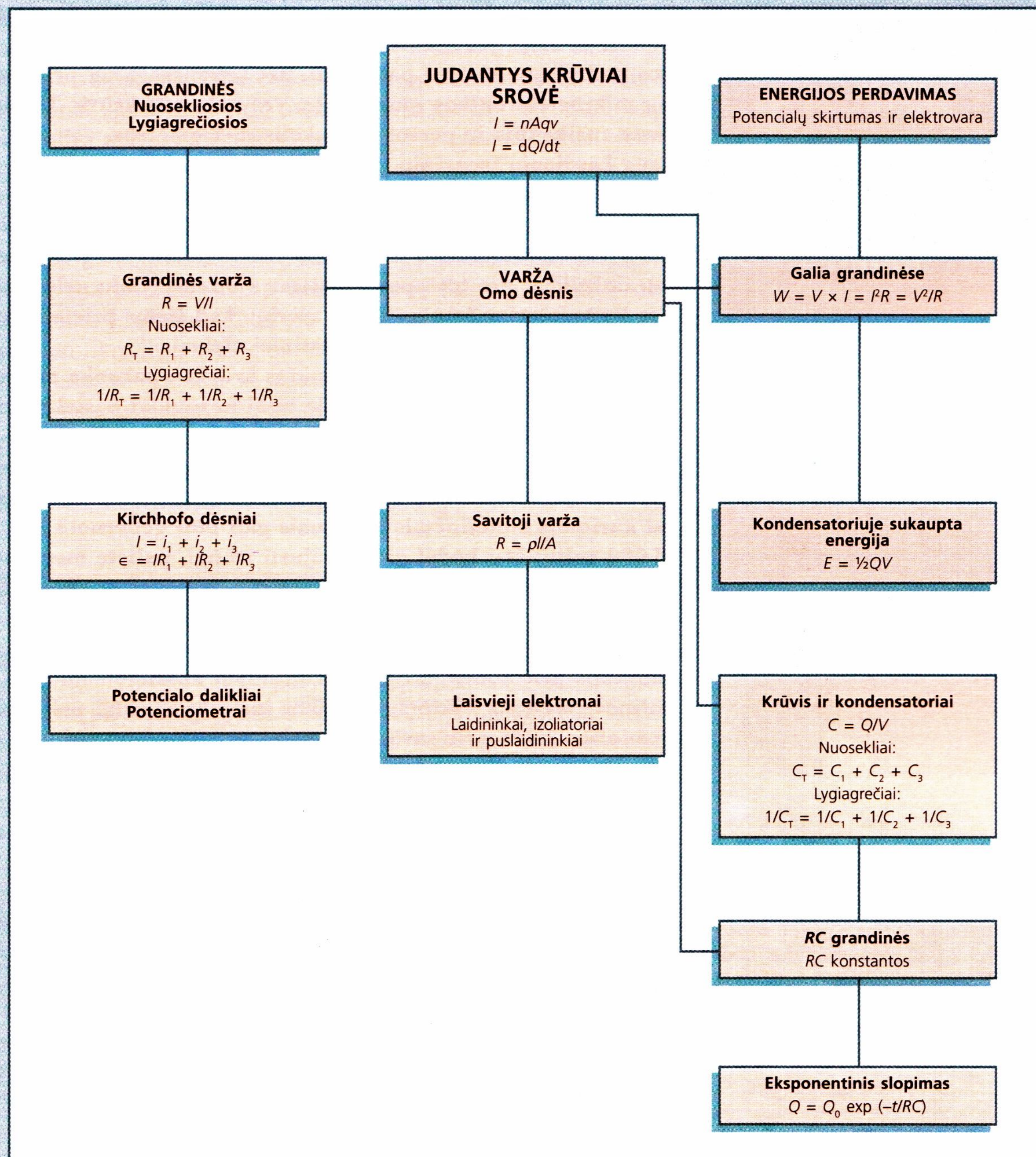
9.U10 pav.

Tokie stiprintuvai kaip šis gali stiprinti įvadų įtampą skirtumo net iki milijono kartų. Taigi, pavyzdžiui, jei dėl įtempimo matuoklio varžos pokyčio įtampa dviejuose stiprintuvo įvaduose pakinta 1 μV (vos 1 mikrovoltu), įtampa išvade pakis 1 V. Tiltelio grandinės ir stiprintuvo kombinacija sudaro labai jautrų prietaisą.

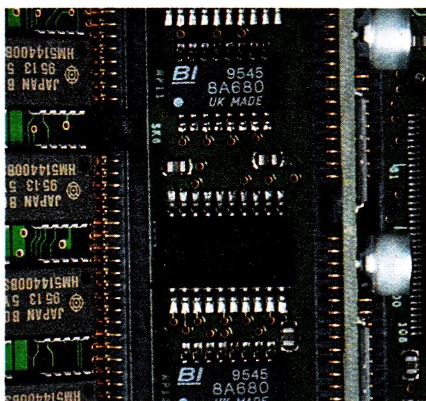
Daugiau apie operacinius stiprintuvus rasite 2-oje knygos dalyje (22 sk.).

KRŪVIS IR SROVĖ

Šiame skyriuje yra daug glaudžiai susijusių sąvokų. Skyriaus schemoje pateiktos šios sąvokos ir jas siejantys ryšiai. Naudodamiesi schema, pasitikrinkite, kaip jūs suprantate visas šias sąvokas, po to perverskite skyrių ir panagrinėkite tekstą iš naujo.



10 Krūvis ir laukas



Jautrūs elektromagnetiniai prietaisai turi būti apsaugoti nuo kasdienių elektrostatinių krūvių



KIBIRKŠTIS, šokanti pro 5 cm ar panašų tarpą Van de Grafo (*Van de Graaff*) generatoriuje, yra dramatiškas statinės elektros padarinys. Mažiau pastebimi, bet keliantys daug problemų mikroelektronikos grandinėse, yra nežymūs krūvio kiekiai, kurie susikaupia ir peršoka per kelis mikrometrus.
Daug kasdienių įrenginių yra valdomi mikroelektroninių prietaisų, – tik pagalvokite apie telefonus, radiją ir televiziją, gatvių šviesoforus, namų apyvokos prietaisus – skalbimo mašinas ir šaldiklius, įvairių transporto sistemų valdymo grandines, geležinkelio ir oro transporto sistemų valdymą. Galų gale apie visą kompiuterinę įrangą. Labai svarbu, kad šiems prietaisams nepakenktų nenumatyti elektrostatiniai efektai.
Grandines gali sugadinti labai mažas krūvis – pakanka mikrokulono dalių. Kasdienėje veikloje visai nesunkiai pasiekiamos palyginus nedidelės įtampos. Pakeitus putplasčiu kimštos kėdės padėtį, gali atsirasti 1500 voltų statinė įtampa drėgnoje atmosferoje ir iki 18 000 voltų, jei labai sausa. Vien vaikštant kai kuriomis sintetinėmis dangomis gali būti generuota iki 35 000 voltų: štai kodėl galite pajusti smūgį, palietę metalinę durų rankeną!
Šitokio dydžio įtampos tikrai gali pakenkti jautrioms mikroelektroninėms grandinėms. Todėl į įrangos konstrukciją įtaisomos priemonės jų opiai elektronikai apsaugoti nuo statinės elektros. Mikroelektronikos inžinieriai netgi prijungia įžeminimo laidą prie savo kūno prieš prisiliesdami prie integrinės grandinės plokštės!

Šio skyriaus klausimai

Daugelis mus supančio pasaulio objektų susideda iš medžiagų, kuriose krūvis subalansuotas, ir aplinkai tokios medžiagos yra elektriškai neutralios. Tačiau jėgos tarp krūvių medžiagų viduje lemia tų medžiagų atsparumą ir visas jų mechanines bei elektrines savybes.

Įelektrinti kūnai veikia vienas kitą tam tikromis jėgomis: kai kurie vienas kitą traukia, kai kurie – stumia. Taip esti todėl, kad yra dvi krūvio rūšys, du ženklai, – juos vadiname teigiamu ir neigiamu. Jų veika gali būti taip apibūdinta:

Vienarūšiai krūviai stumia, nevienarūšiai krūviai traukia.

Šiame skyriuje tuos krūvius nagrinėsime smulkiau. Ypač svarbūs yra krūvių sukelti **elektriniai laukai,** ir krūvininkų judėjimas iš vienos vietos į kitą. Toliau nagrinėsime **kondensatorius,** o pabaigoje atskleisime panašumą tarp elektrinio lauko lygčių ir gravitacinio lauko lygčių.

1 ELEKTROSTATINĖS JĖGOS

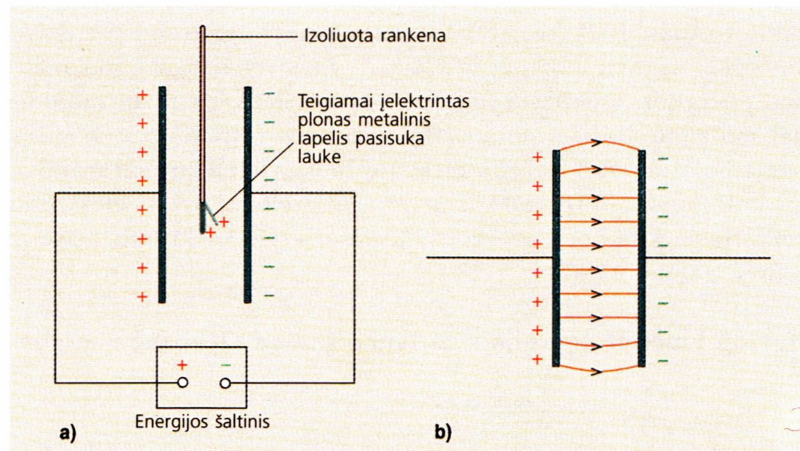
Atomai sudaryti iš mažyčių neigiamai įelektrintų dalelių, vadinamų elektronais, ir šiek tiek didesnių teigiamai įelektrintų dalelių, vadinamų protonais. Kiekviena turi tokį pat (tik priešingo ženklo) krūvį. Krūviai lemia medžiagų elektrostatinę elgseną. Atomai (išskyrus vandenilį) turi ir neutralių dalelių, vadinamų neutronais. Kai dvi medžiagos trinasi viena į kitą, kai kurie vienos medžiagos atomai netenka elektronų, ir įsielektrina teigiamai. Šie elektronai „prilimpa" prie atomų kitoje medžiagoje, suteikdami jai bendrą neigiamą krūvį. (Į televizoriaus ekraną krinta elektronų pluoštelis. Taigi jame kaupiamas neigiamas krūvis, todėl ir išgirstame traškesį palietę ekraną.)

Labai svarbi elektrostatinių jėgų savybė yra ta, kad jos veikia per atstumą. Kailio plaukai gali pasišiaušti, jei priartinamas įelektrintas daiktas (pavyzdžiui, šukos). Kiekvienas įelektrintas kūnas erdvėje aplink kitą įelektrintą kūną yra veikiamas **elektrinio lauko,** ir patiria tam tikrą jėgą. (Palyginkite su gravitaciniais laukais ir magnetiniais laukais, – žr. 4 ir 11 skyrius.) Jėgos kryptis priklauso nuo to, ar krūviai yra vienarūšiai, ar nevienarūšiai. Jėgos dydis priklauso nuo krūvių dydžio ir nuo juos skiriančio atstumo.

Elektriniai laukai veikia labai panašiai kaip gravitaciniai laukai. Pradėsime nagrinėti nuo **vienalyčių** laukų.

2 VIENALYTIS ELEKTRINIS LAUKAS

Laukas tarp dviejų lygiagrečių įelektrintų plokštelių yra vienalytis. Kai įelektrintas kūnas, pavyzdžiui, įsielektrinęs prie izoliuotos rankenos pritvirtintas plonas lapelis (10.1 pav.), patenka tarp tokių plokštelių, lapelis pakyla, kadangi veikianti jėga priverčia jį judėti. Lapelis nukrypsta proporcingai lauko stipriui, ir nuokrypis vienodas visur, kadangi jėga vienoda visuose taškuose tarp plokštelių: laukas yra vienalytis.



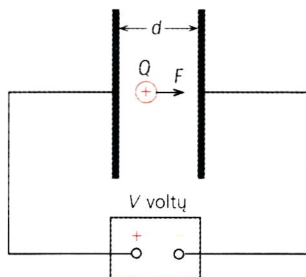
10.1 pav. a) **Lauko tarp dviejų lygiagrečių plokštelių tyrimas.** b) **Elektrinis laukas tarp plokštelių. Centre tolygūs tarpai tarp lauko linijų rodo esant vienalytį lauką. Prie plokštelės kraštų laukas nevienalytis**

Lauko stipris apibrėžiamas kaip jėga, veikianti krūvį (kiekvieną kuloną):

Elektrinio lauko stipris = jėga, niutonais, veikianti vieno kulono krūvį.

Elektrinio lauko stipris matuojamas niutonais kulonui ($N \cdot C^{-1}$).

■ Žr. 1 ir 2 klausimą.



10.2 pav. **Elektrinio lauko stiprio tarp dviejų lygiagrečių plokštelių skaičiavimas**

Jei įelektrintas kūnas gali laisvai judėti, tai jis lauke judės, – laukas atlieka darbą ir greitėjančiai judantis įelektrintas kūnas įgyja energijos.

Kai tarpas tarp plokštelių yra d metrų, tada darbas, atliktas F niutonų jėgos, perkeliant krūvį nuo vienos plokštelės iki kitos, bus

$$F \times d \text{ (džaulių)}$$

Lauko atliktas darbas yra lygus krūvio įgytai energijai. Jei potencialų skirtumas tarp plokštelių yra V voltų, tai energija, kurią įgyja Q kulonų, bus

$$Q \text{ kulonų} \times V \text{ džaulių kulonui} = QV \text{ džaulių}$$

Todėl

$$Fd = QV$$

Pertvarkę gauname:

$$\frac{f}{Q} = \frac{V}{d}$$

Tai alternatyvus ir labai parankus būdas elektrinio lauko stipriui E matuoti:

***E* matuojamas niutonais kulonui = voltais metrui**

PAVYZDYS

K Įvertinkite elektrinį lauką tarp uždegimo žvakės „smaigalių“ (techniškai: elektrodų – *vert. past.*)

A Pirmiausia įvertinkite atstumą tarp smaigalių. Šis paprastai yra labai mažas, sakykim, 0,5 mm. Įtampa tarp smaigalių bus apie 3000 V. Taigi elektrinio lauko stipris:

$$\frac{V}{d} = \frac{3000 \text{ V}}{0{,}5 \text{ mm}}$$

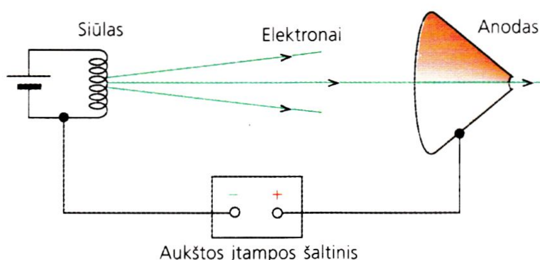
$$= \frac{3000}{5 \times 10^{-4}}$$

$$= 6 \times 10^{6} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$$

Žr. 3, 4 ir 5 klausimą. ■

Elektronų patranka ir elektronvoltai

Televizorių kineskopai, elektroninių osciloskopų vamzdžiai, rentgeno spindulių vamzdžiai ir elektroniniai mikroskopai, – visa tai yra prietaisai, kuriuose naudojami elektronų pluošteliai.



10.3 pav. **Elektronų patranka. Elektronai sklinda iš įkaitinto siūlo ir traukiami teigiamo anodo**

?

A Šio skyriaus pradžioje aprašytos problemos, kurias statinė elektra gali sukelti mikroelektroninėse grandinėse. Tokiose grandinėse medžiaga (paprastai stiklo sluoksnis) tarp laidžios grandinės sluoksnių nebetenka izoliacinių savybių 10^6 V · m^{-1} elektriniame lauke. Kokio dydžio įtampa sukels tokį lauką, jei izoliacija yra 10 μm storio?

B Voltas yra 1 džaulis kulonui. Įrodykite, kad V · m^{-1} yra ekvivalentus N · C^{-1}.

C Apskaičiuokite energiją, įgytą elektrono, a) džauliais ir b) elektronvoltais, jei jis įgavo greitį veikiamas (i) 1 V, (ii) 1000 V, (iii) 1 000 000 V potencialų skirtumo. Pakartokite skaičiavimus alfa dalelei, kurios krūvis +2e.

✓

Elektrono krūvis 1,6 × 10^{-19} C.

1 keV = 1000 eV

1 MeV = 1 000 000 eV

Elektronus emituoja elektronų patrankoje įtaisytas kaitinamasis vielinis siūlas. 10.3 pav. atvaizduota paprasta elektronų patranka, kurioje siūlas yra taip pat ir katodas. Elektronai, įgavę pakankamai energijos, atitrūksta nuo vielos paviršiaus, esant **termojoninei emisijai.** Didelis potencialų skirtumas tarp siūlo ir kūgio – teigiamojo anodo – sukelia elektrinį lauką, ir elektronai traukiami link anodo. Tarp siūlo ir anodo jie greitėja, nes iš elektrinio lauko įgyja kinetinės energijos. Jei m ir e yra elektrono masė ir krūvis, galime užrašyti:

Įgytoji kinetinė energija = iš lauko gautoji elektrinė energija

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV,$$

kur v yra elektrono greitis po to, kai jį pagreitino potencialų skirtumas V. Elektrono įgyta energija yra eV džaulių arba V elektronvoltų. Vienas elektronvoltas yra energija, kurią įgyja 1,6 × 10^{-19} kulonų krūvį turinti dalelė, įgavusi greitį veikiant vieno volto potencialų skirtumui. Elektronvoltas yra patogesnis energijos vienetas už džaulį, kai nagrinėjame atomo dydžio dalelių energijas.

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite 5 MeV alfa dalelės, kurios masė $6{,}646 \times 10^{-27}$ kg, greitį.

A Visa alfa dalelės energija yra kinetinė energija. Todėl

$$\tfrac{1}{2}mv^2 = 5 \text{ MeV}$$

Kad galėtume apskaičiuoti, energija turi būti išreikšta džauliais:

$$5 \text{ MeV} = (1{,}6 \times 10^{-19}) \times (5 \times 10^6)$$
$$= 8{,}0 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Dabar galime užrašyti:

$$0{,}5 \times (6{,}646 \times 10^{-27}) \times v^2 = 8{,}0 \times 10^{-13}$$

$$v^2 = \frac{8{,}0 \times 10^{-13}}{0{,}5 \times (6{,}646 \times 10^{-27})}$$

$$= \frac{8{,}0}{0{,}5 \times 6{,}646} \times 10^{14} = 2{,}4 \times 10^{14}$$

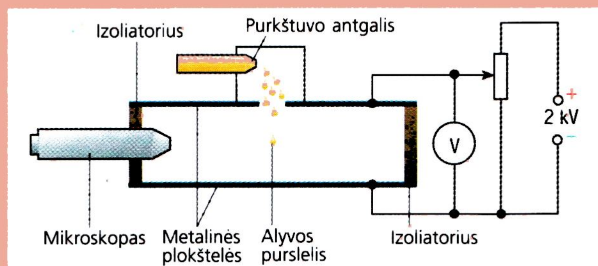
Todėl

$$v = \sqrt{(2{,}4 \times 10^{14})} = 1{,}6 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

■ Žr. 6, 7 ir 8 klausimą.

Elektrono krūvis – Milikeno bandymas

Robertas Milikenas (*Millikan*), amerikiečių fizikas, 1917 m. išrado labai sumanų būdą elektrono krūviui išmatuoti. Jis purškė smulkius alyvos purslus tarp dviejų lygiagrečių įelektrintų plokštelių ir mikroskopu atidžiai stebėjo jų judėjimą (10.4 pav.).



10.4 pav. Milikeno alyvos purslų bandymo aparatas

Milikeno aparatu nustatome, kad daugybė alyvos purslų įsielektrina, išpurkšti pro mažytę purkštuvo skylutę. Dauguma įelektrintų purslų yra neigiami, ir juos veikia elektrinio lauko tarp plokštelių jėga. Visi alyvos purslai yra veikiami gravitacijos ir oro keliamosios jėgos.

Atidžiai derindamas įtampą tarp plokštelių, Milikenas sugebėjo kai kuriuos iš įkrautųjų purslelių sustabdyti. Tada jis žinojo, kad tokį purslelį veikianti atstojamoji jėga lygi nuliui. Purslelio svoris ir pasipriešinimas dėl oro molekulių buvo atsveriami jį veikiančios elektrinės jėgos.

Pagal Stokso dėsnį (žr. 189 puslapį) jėga F, veikianti r spindulio sferinį alyvos purslelį, kuris juda v greičiu η klampumo aplinkoje, yra tokia:

$$F = 6\pi r\eta v$$

Kai alyvos tankis ρ, purslelio masė:

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho$$

o jo svoris

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho g$$

Purslą veikia Archimedo jėga, lygi išstumto oro svoriui

$$\text{Archimedo jėga} = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_A g$$

kur ρ_A yra oro tankis.

Todėl efektinis alyvos purslo svoris P

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_A)$$

Betgi, jei lašelis juda ribiniu v_r greičiu, tai efektinis svoris

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_A) = 6\pi r\eta v_r$$

Elektrinio lauko stipris E tarp plokštelių, nutolusių d metrų viena nuo kitos,

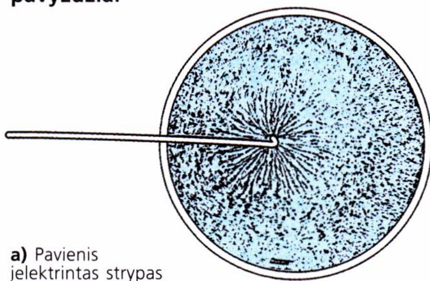
$$E = \frac{V}{d}$$

Jei elektrinė jėga yra panaudota taip, kad Q krūvio lašelis juda pastoviu greičiu, tai

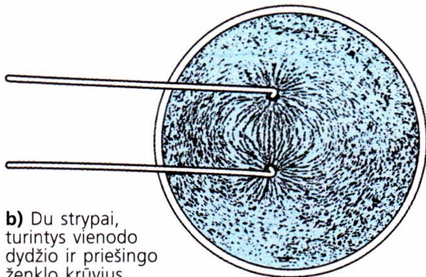
$$F_E = QE = P = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_A)$$

Milikenas atliko daug stebėjimų, atidžiai išmatavo įtampą, reikalingą gauti kiekvieno purslelio pastovų greitį. Iš šių matavimų jis sugebėjo apskaičiuoti mažiausią purslelio krūvį. Tai buvo $1{,}6 \times 10^{-19}$ C. Jis taip pat atrado, kad kiti elektringi purslai turėjo arba tokį patį krūvio kiekį, arba šio krūvio sveikąjį kartotinį. Jis padarė išvadą, kad $1{,}6 \times 10^{-19}$ C yra mažiausias įmanomas krūvis, ir kad tai turi būti viename elektrone esantis krūvis.

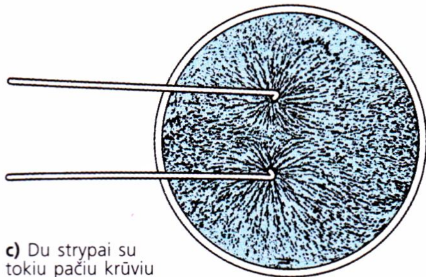
10.5 pav. **Kai kurių elektrinių laukų pavyzdžiai**



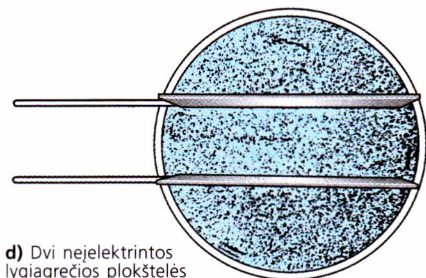
a) Pavienis įelektrintas strypas



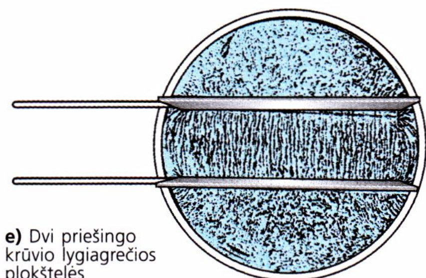
b) Du strypai, turintys vienodo dydžio ir priešingo ženklo krūvius



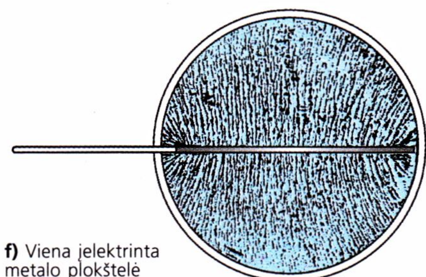
c) Du strypai su tokiu pačiu krūviu



d) Dvi neįelektrintos lygiagrečios plokštelės



e) Dvi priešingo krūvio lygiagrečios plokštelės



f) Viena įelektrinta metalo plokštelė

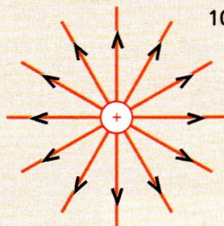
Elektrinio lauko kryptis

Įelektrintas metalinis lapelis tarp dviejų lygiagrečių plokštelių nukrypsta visada ta pačia kryptimi, nesvarbu kurioje vietoje tarp plokštelių jis yra, – tai reiškia kad elektrinis laukas turi kryptį. Jei potencialų skirtumas tarp plokštelių būtų priešinga kryptimi, tai lauko kryptis irgi pasikeistų priešinga, o lapelis nukryptų į priešingą pusę.

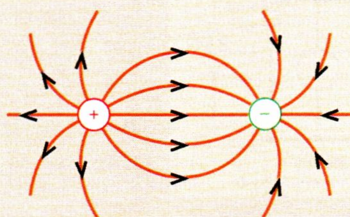
Elektrinio lauko tarp plokštelių kryptis yra jėgos, veikiančios teigiamą krūvį, kryptis, t. y. nuo teigiamos link neigiamos. Bet kurio elektrinio lauko kryptis yra tokia; tuo galima pasinaudoti netgi laukui aplink atskirą krūvį apibūdinti.

Laukas paprastai vaizduojamas linijomis, atitinkančiomis dalelyčių išsidėstymą 10.5 pav. ir braižomas kaip parodyta 10.6 pav. Lauko linijos atitinka jėgų veikimą, o strėliukės rodo jėgos kryptį (iš teigiamo į neigiamą). Lauko stiprį atspindi linijų tankis, – kuo glaudesnės linijos, tuo stipresnis laukas. Tarp lygiagrečių plokštelių linijos išsidėsčiusios lygiais tarpais, rodydamos esant vienalyčio stiprio lauką.

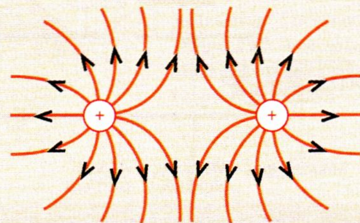
10.6 pav. **Kai kurių elektrinių laukų diagramos**



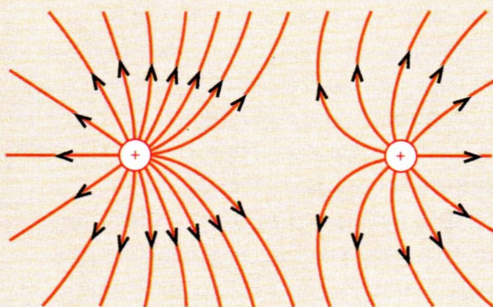
a) Pavienio krūvio laukas



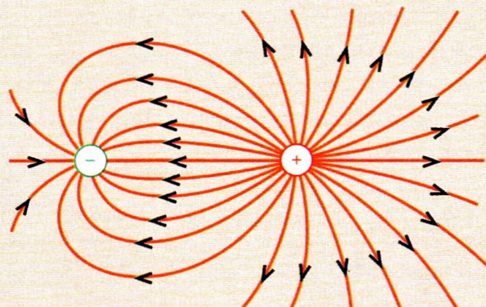
b) Lygūs ir priešingi krūviai



c) Lygūs ir vienodo ženklo krūviai

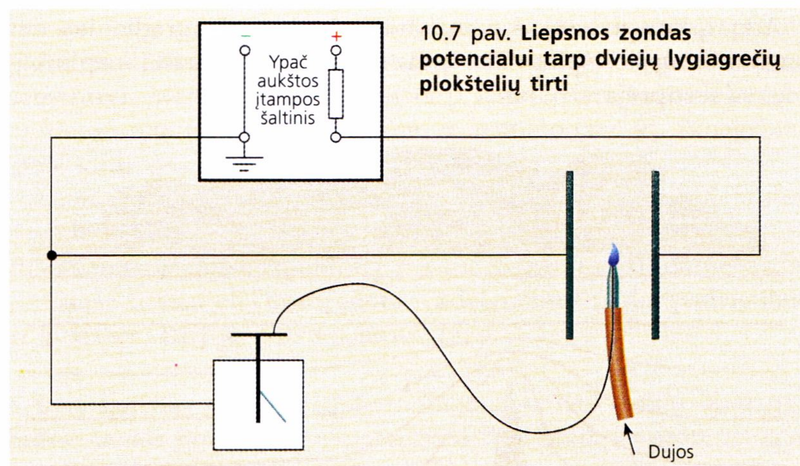


d) Nelygūs ir vienodo ženklo krūviai

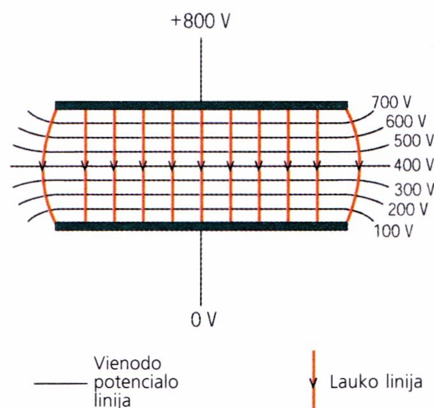


e) Nelygūs ir priešingų ženklų krūviai

3 ELEKTRINIS POTENCIALAS IR EKVIPOTENCIALĖS



10.7 pav. **Liepsnos zondas potencialui tarp dviejų lygiagrečių plokštelių tirti**



10.8 pav. **Ekvipotencialės ir lauko linijos tarp dviejų lygiagrečių plokštelių. Lauko linijos visada kerta ekvipotenciales stačiais kampais**

Voltmetras rodo potencialų skirtumą tarp lygiagrečių plokštelių. Liepsnos zondas pasitelkiamas matuoti įtampai erdvės taškuose tarp plokštelių (10.7 pav.): įtampa didėja, zondui judant nuo kairiosios plokštelės, kuri turi 0 V įtampą, link dešiniosios plokštelės. Tiksliau, zondas matuoja įtampą *lauke tarp plokštelių*. Ši įtampa vadinama **elektriniu potencialu.** Potencialas gali būti apibrėžtas kaip potencialų skirtumas tarp plokštelės, kurios įtampa 0 V (arba nulinio potencialo), ir zondo.

Stumdant zondą išilgai plokštelių, potencialas lieka toks pat: zondas juda išilgai **ekvipotencialės,** t. y. vienodos įtampos ar potencialo paviršiaus. Ekvipotencialės yra visuomet statmenos lauko jėgų linijoms (10.8 pav.). Atkreipkite dėmesį, kad ties plokštelių kraštais, kur laukas nevienalytis, ekvipotencialės vis dar statmenos lauko linijoms.

Potencialas tolygiai kinta vienalyčiame lauke. 10.9 pav. pateiktas potencialo priklausomybės nuo atstumo tarp plokštelių grafikas. Brėžinyje matyti, kad potencialo gradientas yra pastovus ir neigiamas. Pažymėjus atstumą *r*, lauko stiprį (jėgą, veikiančią vienetinį krūvį) nusako lygtis

Lauko stipris = – (potencialo gradientas)

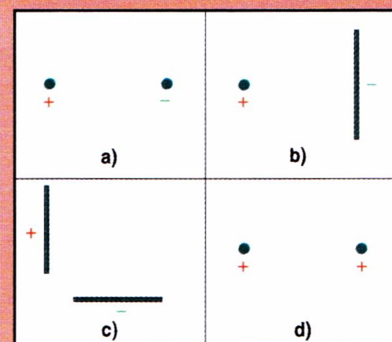
$$E = -\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}r}$$

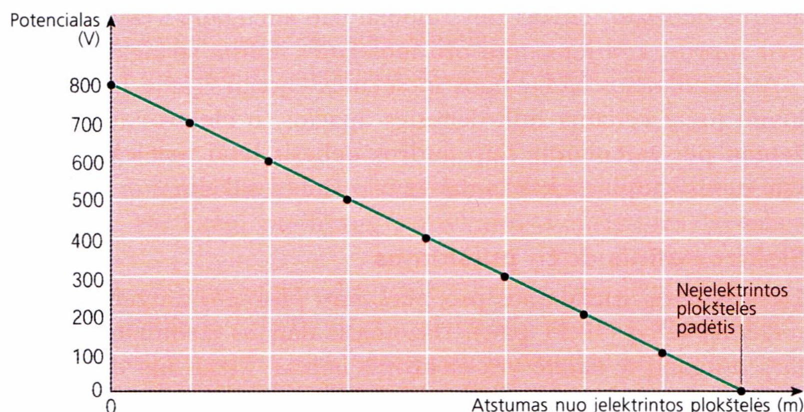
Nors šis sąryšis buvo išvestas vienalyčiam laukui, vėliau pamatysime, kad jis teisingas visiems laukams.

■ Žr. 9 klausimą.

?

D persibraižykite šias keturias elektrodų diagramas ir pavaizduokite elektrinius laukus tarp jų. Pavaizduokite laukų kryptį. Savo diagramas papildykite ekvipotencialėmis.



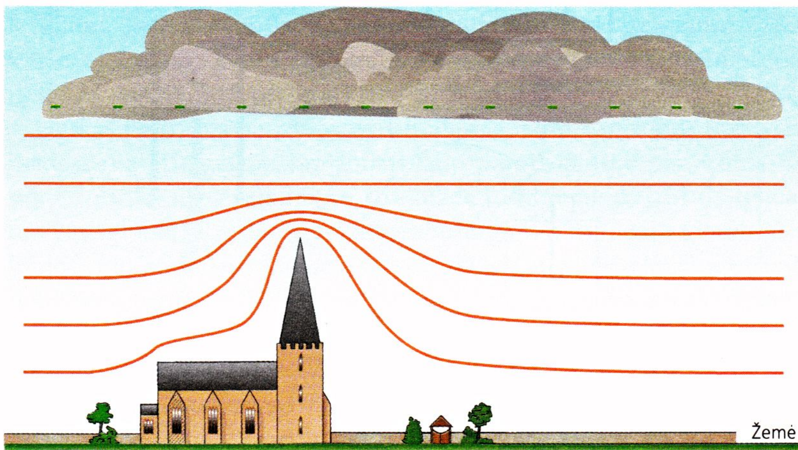


10.9 pav. **Potencialas tarp dviejų įelektrintų lygiagrečių plokštelių nubraižytas priklausomai nuo atstumo iki teigiamos plokštelės**

Nevienalyčiai laukai

Nevienalyčiuose laukuose potencialo gradientas kinta. 10.10a) pav. atvaizduotas elektrinis laukas po audros debesimi.

Atkreipkite dėmesį, kaip padidėja potencialo gradientas ties smailu bažnyčios špiliu. Tas špilis iškreipia lauko raštą – aplink jį laukas sustiprėja.



10.10a) pav. **Ekvipotencialės po audros debesiu. Atkreipkite dėmesį, kaip ekvipotencialės sutankėja aplink smailą bažnyčios špilį**



10.10b) pav. **Staigi audros debesies iškrova**

E Sausą dieną virš lygaus kraštovaizdžio atlikti matavimai rodo, kad elektrinis potencialas gali padidėti apie 100 voltų metrui.

a) Koks yra potencialų skirtumas tarp žemės ir 1,8 m atstumo virš jos?

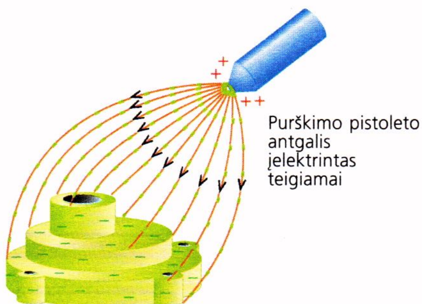
b) Žmogus yra 1,8 m ūgio. Kodėl nėra tokios įtampos tarp žmogaus nosies ir pėdų?

c) Nupieškite ekvipotencialės aplink žmogų, stovintį lauke.

Žr. užduotyje daugiau apie krūvio pasiskirstymą audros debesyje ir žaibo sklidimą. ■

Ši savybė panaudojama įrengiant žaibolaidžius – tai iš esmės tėra nusmailinti metaliniai strypai. Vienas galas įžemintas, o smailasis galas iškeliamas aukščiau pastato, prie kurio jis pritvirtintas, viršaus. Audros debesies apačioje dažnai būna neigiamo krūvio sankaupa. Ši generuoja elektrinį lauką tarp debesies ir žemės. Po audros debesimi laukas ties žaibolaidžio smaigaliu yra pakankamai stiprus, kad jonizuotų oro molekules aplink smaigalį.

Atsirandančios elektringos molekulės – jonai – juda lauke: teigiami jonai keliauja link debesies apačios, o elektronai keliauja žemėn per žaibolaidį. Taip audros debesis lėtai išsielektrina iki dar nesusikaupia pakankamai krūvio žaibui sukelti.



10.11 pav. **Elektrostatinis dažų purškimas: elektringi purslai juda pagal lauko linijas iki įžeminto dažomo daikto**

Elektrostatinis dažų purškimas

Dažų dalelės, išlėkdamos pro purškimo pistoleto antgalį, įgauna teigiamą krūvį (10.11 pav.). Dažomasis daiktas įžeminamas, taigi tarp antgalio ir daikto yra elektrinis laukas. Elektringi dažų pursleliai juda pagal lauko linijas ir tolygiai padengia daikto paviršių.

4 LYGIAGREČIŲ PLOKŠTELIŲ KONDENSATORIUS

Iki šiol nagrinėdavome elektrinį lauką tarp dviejų lygiagrečių plokštelių. Tokia iš tiesų gali *kaupinti elektros krūvį* – būti **kondensatoriumi.** Matėme, kad laukas tarp kondensatoriaus elektrodų priklauso nuo potencialų skirtumo ir atstumo tarp jų. Panagrinėkime kitus veiksnius, lemiančius lauko stiprį.

Tarp elektrodų sudaromas potencialų skirtumas – kondensatorius įkraunamas (žr. 217 p.). Iš tikrųjų, elektrodų krūvis proporcingas potencialų skirtumui ($Q = CV$). Krūvio elektroduose dydis priklauso ir nuo elektrodų ploto. Padvigubinus plotą, padvigubėja ir krūvis, kurį jis gali sukaupti. Taigi

$$Q \sim A$$

Krūvio santykis su plotu (Q/A) vadinamas krūvio tankiu. Kadangi krūvio tankis proporcingas potencialų skirtumui, jis proporcingas ir lauko stipriui:

krūvio tankis ~ lauko stipriui

$$\frac{Q}{A} \sim \frac{V}{d}$$

Yra dar vienas veiksnys, nuo kurio priklauso lauko stipris. Tai terpė tarp elektrodų, **dielektrikas.** Tai izoliatorius; paprasčiausias dielektrikas yra vakuumas. Dažnai izoliavimo medžiaga būna oras, alyva ar popierius. Kai tarp elektrodų yra vakuumas,

$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \frac{V}{d},$$

kur ε_0 yra vadinamoji **elektrinė konstanta,** siejanti krūvio tankį ir lauko stiprį. Ji matuojama faradais metrui ir rodo, kiek tuščia erdvė (vakuumas) geba leisti susikurti elektriniam laukui.

ε_0 vertė yra $8{,}85 \times 10^{-12}$ F · m^{-1}, arba kitaip $8{,}85 \times 10^{-12}$ C^2 · N^{-1} · m^{-2}.

Kitaip užrašę lygtį gauname **talpos** išraišką (simbolis C):

$$C = \frac{Q}{V}$$
$$= \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

Antroje lygties eilutėje talpa išreikšta fiziniais dielektrinės terpės ir kondensatoriaus matmenimis.

Praktikoje įvairios talpos kondensatoriams naudojamos įvairios dielektrinės medžiagos (žr. 10.2 lentelę).

Talpos lygtį truputį pakeisime, atsižvelgę į dielektriką:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d},$$

kur ε_r vadinama dielektriko **santykine skvarba.** 10.1 lentelėje pateiktos kai kurių medžiagų santykinės dielektrinės skvarbos vertės.

Kondensatoriaus elektrodus gaubia krūvio „apvalkalas“. Krūvis tolygiai pasklinda beveik visame elektrodo plote, – tik ties kraštais jis pasiskirstęs šiek tiek netolygiai, ir daugiau krūvio koncentruojasi ties bet kokiais „aštriais“ kraštais ir kampais.

✓

Faradas (simbolis F) yra talpos vienetas: 1 farado kondensatorius, įkrautas 1 V potencialų skirtumu, turi 1 kulono krūvį. Praktikoje naudojami daug mažesnės talpos kondensatoriai – jų talpa svyruoja nuo mikrofaradų iki pikofaradų.

■ Žr. 10 ir 11 klausimą.

?

F a) Reikalingas 1 μF kondensatorius su oro tarpu. Koks turi būti elektrodų plotas, jei atstumas tarp jų 1 mm.

b) Žėručio santykinė dielektrinė skvarba yra 6. Koks turi būti kondensatoriaus elektrodų plotas? Dielektrikas yra žėrutis.

10.1 lentelė. **Kai kurių medžiagų santykinė dielektrinė skvarba**

Medžiaga	Santykinė dielektrinė skvarba
Oras	1
Popierius	Nuo 2 iki 3
Vanduo	Apie 80

PRAKTIKOJE NAUDOJAMI KONDENSATORIAI

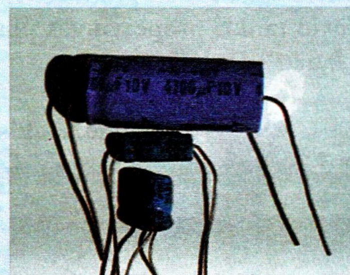
YRA DAUG SKIRTINGŲ kondensatorių rūšių, pagamintų iš skirtingų medžiagų ir tinkamų skirtingiems tikslams. Jų būna įvairios formos ir dydžio, jų talpos – nuo pikofaradų iki faradų. Kondensatoriai naudojami kaupti krūviui (ir energijai), „nuslopinti" įtampos svyravimams (žr. 228 p.) ar leisti aukšto dažnio signalams „aplenkti" grandinės dalis. Jie nepakeičiami grandinėse, kuriose reikia išskirti tam tikrą dažnį.

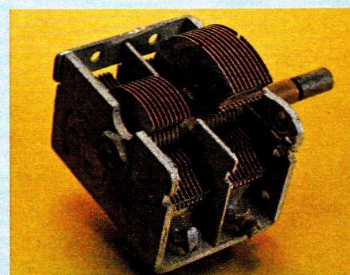
Pavyzdžiai – derinama radijo imtuvų grandinė (žr. 293 p.), naudojama išskirti tam tikro dažnio signalą, ir filtrai, pagrįsti tuo, kad kondensatoriaus veikimas kintamosios srovės grandinėse priklauso nuo dažnio. Parinkus tinkamus kondensatorius, filtrai reaguos į labai siauras signalo dažnių juostas, kurios gali būti praleidžiamos arba, priešingai, nuslopinamos.

Kartais reikalingi labai tikslūs kondensatoriai, paprastai nedidelės talpos – daugiausia pF ar nF. Labai didelės talpos kondensatoriai naudojami, kai reikia slopinti svyravimus – ten tikslumas nesvarbus.

Visi kondensatoriai ilgainiui netenka krūvio, t. y. jie „nesandarūs"! Dauguma kondensatorių yra griežtai apibrėžtos talpos, tačiau kai kurių talpa kinta verčių intervale, kaip kad derinamose grandinėse. 10.2 lentelėje pateikti kai kurie dažnai naudojamų kondensatorių tipai.







10.12 pav.
Viršuje: mažos vertės keraminiai kondensatoriai

Centre: Aliuminio elektrolitiniai kondensatoriai

Apačioje: kintamasis kondensatorius

10.2 lentelė

Tipas	Talpos diapazonas	Maksimali įtampa	Tikslumas	Sandarumas	Pastabos
Žėrutinis	1 pF–10 nF	100–600	Geras	Geras	Labai naudingi radijo dažnių diapazone
Keraminis	10 pF–1 μF	50–30 000	Nedidelis	Patenkinamas	Pigūs, maži
Polistireninis	10 pF–2,7 μF	100–600	Puikus	Puikus	Aukštos kokybės, naudojami tiksliuose filtruose
Polikarbonatinis	100 pF–30 μF	50–800	Puikus	Geras	Aukštos kokybės, maži
Tantalinis	100 nF–500 μF	6–100	Nedidelis	Nedidelis	Didelės talpos, poliarizuoti
Elektrolitiniai (aliuminio)	100 nF–2 F	3–600	Visiškai netikslus	Blogas	Maitinimo šaltinių filtruose, poliarizuoti

Dielektriko poveikis

Izoliacinės medžiagos tarp kondensatoriaus elektrodų padidina talpą. Tai reiškia, kad daugiau krūvio gali būti sukaupta, esant tai pačiai įtampai tarp elektrodų, ir šis poveikis yra didesnis, kai naudojamos medžiagos su didesnėmis ε_r vertėmis. Daugiau apie dielektrikus žr. 2-oje knygos dalyje (20 sk.).

?

G Du vienodo dydžio ir masės rutuliai turi vienodo ženklo krūvius. Paaiškinkite, kas atsitiks stūmos jėgai tarp jų, jei

a) vieno jų krūvis bus padvigubintas,

b) abiejų krūvis bus padvigubintas,

c) abiejų krūvis bus padvigubintas, ir atstumas tarp jų bus padvigubintas.

H Vandenilio atome elektronas ir protonas yra apie 10^{-10} m vienas nuo kito. Apskaičiuokite traukos jėgą tarp jų.

5 NEVIENALYTIS ELEKTRINIS LAUKAS – KULONO DĖSNIS

1785 m. Kulonas išmatavo jėgas tarp mažų įelektrintų kūnų ir apibendrino savo rezultatus lygtimi, kuri dabar žinoma kaip Kulono dėsnis. Jis atrado, kad jėga F priklauso nuo kūnų krūvių Q_1 ir Q_2, ir nuo atstumo tarp jų. Atstumui didėjant, jėga mažėja, – iš tikrųjų, jei atstumas padvigubėja, jėga sumažėja keturis kartus. Kitaip sakant, jėga paklūsta atvirkštinio kvadrato dėsniui:

$$F = k\frac{Q_1Q_2}{r^2},$$ kur k yra konstanta.

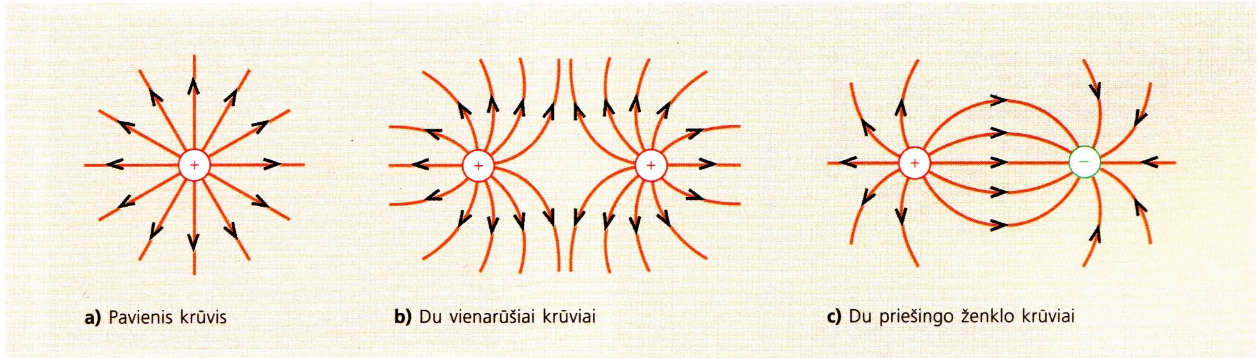
Ši lygtis beveik tapati Niutono traukos dėsniui:

$$F = -G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

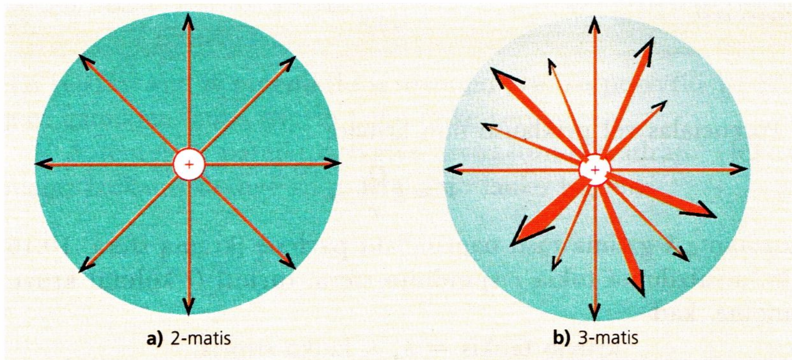
Skirtingai nuo gravitacijos, kuri visuomet traukia, elektrinė jėga gali būti arba traukianti, arba stumianti. Žr. 10.13 pav.: kai krūviai priešingi, jėga yra traukianti, ir apibrėžiama kaip neigiama, analogiškai gravitacijai; kai krūviai yra to paties ženklo, jėga yra stumianti ir apibrėžiama kaip teigiama.

10.14 pav. atvaizduotas laukas aplink pavienį krūvį. 10.14a) pav. yra dvimatis atvaizdas, tačiau laukas aplink krūvį yra trimatis. 10.14b) pav. mėginta tai pavaizduoti.

■ Žr. 12 ir 13 klausimus.



10.13 pav. **Elektriniai laukai aplink taškinius krūvius**



10.14 pav. **Laukas aplink pavienį krūvį**

Lauko linijos sklinda spinduliais iš centro. Tačiau vėlgi, šis lauko linijų „planas“ padeda įsivaizduoti lauką, tačiau yra ribotas. Labai sunku tokiame „plane“ pavaizduoti tikslų lauko dydžio kitimą. Žemiau pateiktos lygtys padeda spręsti šią problemą.

Lauko stipris

Elektrinio lauko stipris E gali būti išmatuotas pasirinkus antrą „bandomąjį“ krūvį Q_2 veikiančią jėgą, atstumu r nuo krūvio Q_1:

$$\text{lauko stipris} = \text{jėga krūvio vienetui}$$

$$= \left(\frac{lQ_1Q_2}{r^2}\right)/Q_2$$

$$E = \frac{kQ_1}{r^2}$$

Taigi lauko stipris nevienalyčiame elektriniame lauke irgi paklūsta atvirkštinio kvadrato dėsniui.

PAVYZDYS

K Elektrinio lauko stipris 50 cm nuo mažos įkrautos sferos yra 18 N · C^{-1}. Apskaičiuokite krūvį sferoje. (k = 9 × 10^9.)

A Lauko stipris yra

$$E = k\frac{Q}{r^2} = 18\ \mathrm{N \cdot C^{-1}}$$

Pertvarkius lygtį:

$$Q = \frac{Er^2}{k}$$

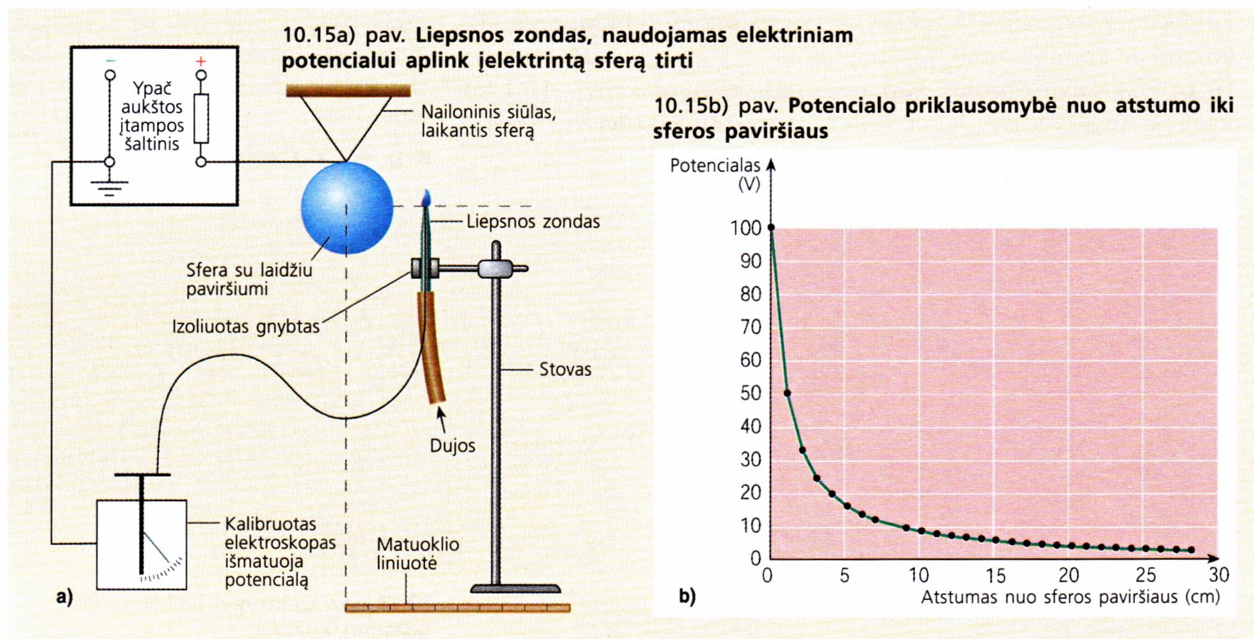
$$= \frac{18 \times (5 \times 10^{-1})^2}{9 \times 10^9}$$

$$= \frac{18 \times 25 \times 10^{-2}}{9 \times 10^9} = 50 \times 10^{-11}$$

$$= 5 \times 10^{-10}\ \mathrm{C}$$

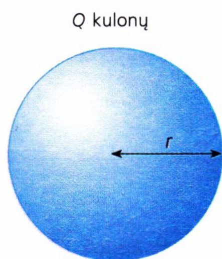
Potencialas centriniame lauke

Liepsnos zondas, kurį naudojome tirti potencialams tarp lygiagrečių elektrodų (žr. 10.7 pav.), gali būti naudojamas tirti, kokiu būdu elektrinis potencialas kinta aplink pavienį įkrautą kūną, šiuo atveju – rutulį (10.15 pav.). Potencialas mažėja pagal $1/r$ dėsnį.



10.15a) pav. **Liepsnos zondas, naudojamas elektriniam potencialui aplink įelektrintą sferą tirti**

10.15b) pav. **Potencialo priklausomybė nuo atstumo iki sferos paviršiaus**



10.16 pav. **Pavienė įkrauta sfera**

Potencialas vėl priklauso nuo krūvio:

$$V = k\frac{Q_1}{r}$$

Konstantą k galima rasti nagrinėjant pavienę įkrautą sferą. 10.16 pav. atvaizduota tokia r spindulio sfera, turinti Q kulonų krūvį. Žinome, kad

$$\text{krūvio tankis} = \varepsilon_0 \times \text{lauko stipris},$$

$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \frac{kQ}{r^2},$$

kur $A = 4\pi r^2$, sferos paviršiaus plotas. Todėl

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = \varepsilon_0 \frac{kQ}{r^2}$$

Suprastinus krūvį ir spindulį, lieka

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

Žr. 14 ir 15 klausimus. ■

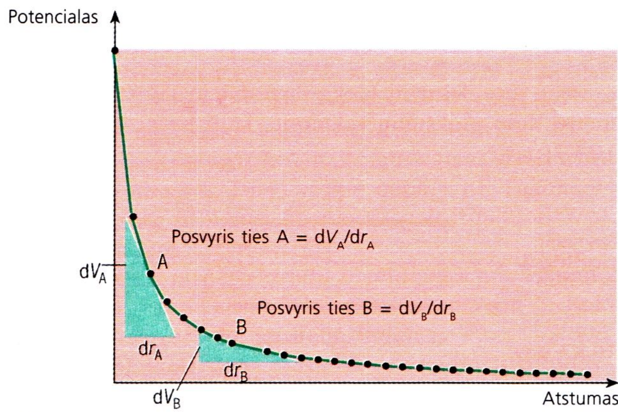
Sąryšis tarp lauko ir potencialo

Anksčiau šiame skyriuje (235 p.) nustatėme, kad lauko stipris lygus potencialo gradientui su priešingu ženklu:

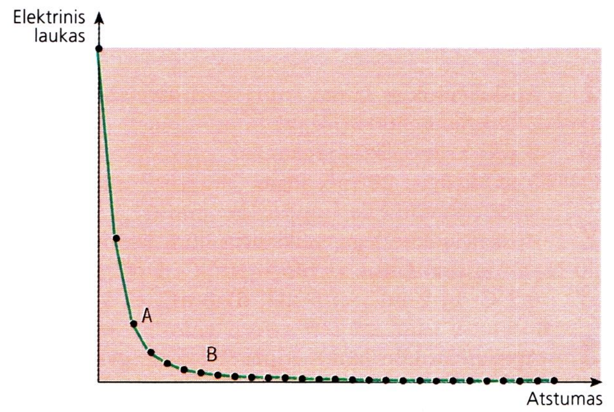
$$E = -\frac{dV}{dr}$$

?

I 10.16a) pav. atvaizduota, kaip kinta potencialas aplink įelektrintą sferą. Nubraižykite grafiką, rodantį, kaip potencialas kinta a) arti plokščio paviršiaus, ir b) toli nuo to paviršiaus.



a) Potencialo priklausomybės nuo atstumo grafikas



b) Elektrinio lauko priklausomybės nuo atstumo grafikas

10.17 pav. **Sąryšis tarp potencialo ir elektrinio lauko. Iš potencialo ir atstumo priklausomybės kreivės gradiento gauname lauko stiprį bet kuriame taške**

Tas pat galioja laukams, kurie kinta pagal atvirkštinio kvadrato dėsnį. Galime tai pagrįsti matematiškai:

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r}$$

$$E = -\frac{dV}{dr}$$

$$= -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{d(1/r)}{dr}$$

Todėl

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r}$$

Tai reiškia, kad iš potencialo ir atstumo grafiko posvyrio 10.17a) pav. gauname lauko stiprio tame taške vertę.

10.3 lentelėje pateiktos lygtys atvirkštinio kvadrato elektriniams laukams drauge su gravitacinio lauko lygtimis.

10.3 lentelė. **Elektrinio ir gravitacinio lauko lygčių palyginimas**

Gravitacinis laukas	Elektrinis laukas
$F_G = -G\frac{m_1 m_2}{r^2}$	$F_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
$G = -G\frac{m}{r^2}$	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}$
$V_G = -G\frac{m}{r}$	$V_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r}$

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėtumėte žinoti ir suprasti štai ką:

- Laukas tarp įelektrintų plokštelių yra vienalytis.
- Elektrinio lauko stipris yra jėga, tenkanti krūvio vienetui, išmatuota niutonais kulonui.
- Vienalyčio lauko lygtis yra tokia: $E = F/Q = V/d$.
- Darbas, atliekamas perkeliant Q kulonų krūvį, kai potencialų skirtumas V voltų, yra QV džaulių.
- Elektrono, emituojamo elektronų patrankos, kinetinę energiją gauname iš tokios lygties: $\frac{1}{2} mv^2 = eV$.
- Elektronvoltas yra energija, įgyjama $1{,}6 \times 10^{-19}$ kulonų krūvį turinčios dalelės, kai ši įgauna greitį veikiama 1 V potencialų skirtumo.
- Potencialas elektrinio lauko taške – tai atliekamas darbas, tenkantis kulonui, perkeliant vienetinį krūvį iš nulio ar žemės potencialo iki to lauko taško.
- Ekvipotenciales galima įsivaizduoti kaip vienodo potencialo paviršius erdvėje, kertančius elektrinio lauko linijas stačiu kampu.
- Lauko stipris E lygus potencialo gradientui dV/dr.
- Krūvio tankis = dielektrinė skvarba × tuščios erdvės lauko stipris, o talpa $C = \varepsilon_0 A/d$.
- Jėga tarp dviejų krūvių gaunama pagal Kulono dėsnį, $F = kQ_1Q_2/r^2$, o lauko stipris $E = kQ/r^2$, kur $k = 1/4\pi\varepsilon_0$.
- Potencialas aplink krūvį Q yra toks: $V = kQ/r$.

KLAUSIMAI

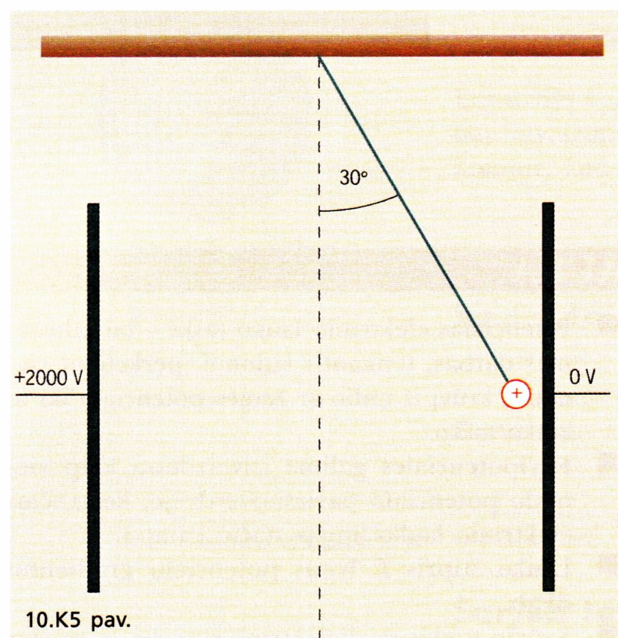
1 Apskaičiuokite lauko stiprį šiais atvejais:
a) 2 C krūvis, 500 N jėga;
b) 2 mC krūvis, 5 N jėga;
c) 5 μC krūvis, 20 mN jėga.

2 Apskaičiuokite jėgą, veikiančią šiuos krūvius 50 $N \cdot C^{-1}$ stiprio lauke. (1 nC = 10^{-9} C; 1 pC = 10^{-12} C.)
a) 0,2 C; **b)** 2 mC; **c)** 5 μC; **d)** 2 nC; **e)** 5 pC.

3 Apskaičiuokite lauko stiprį šitokiose grandinėse:
a) dvi plokštelės 2 m atstumu viena nuo kitos, su 10 000 V potencialų skirtumu tarp jų;
b) dvi plokštelės 2 cm atstumu viena nuo kitos, su 100 V potencialų skirtumu tarp jų;
c) dvi plokštelės 0,2 mm atstumu viena nuo kitos, su 1 V potencialų skirtumu tarp jų.

4 Dvi plokštelės yra 2 cm atstumu viena nuo kitos, ir tarp jų yra 1000 V potencialų skirtumas. Kokia jėga veikia mažą lengvą 5 nC krūvio kūną, patalpintą tarp plokštelių?

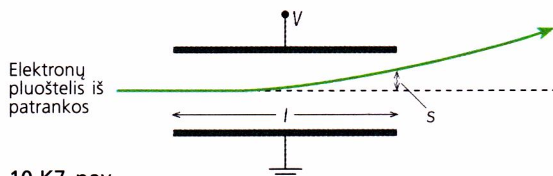
5 Įelektrintas 2 g masės polistireno rutuliukas pakabintas ant plono nailoninio siūlo tarp dviejų plokštelių, esančių 5 cm viena nuo kitos (10.K5 pav.). Kai tarp plokštelių yra 2000 V potencialų skirtumas, siūlas, laikantis rutuliuką, nukrypsta nuo rutulio vertikalės 30° kampu. Apskaičiuokite rutuliuko krūvį. (g = 9,8 $N \cdot kg^{-1}$.)



10.K5 pav.

6 Apskaičiuokite 5 MeV alfa dalelės greitį. (Alfa dalelės masė yra $6{,}646 \times 10^{-27}$ kg; alfa dalelės krūvis yra $3{,}2 \times 10^{-19}$ C.)

7 Elektronų pluoštelis, išlėkęs iš elektronų patrankos, yra nukreipiamas s metrų atstumu vertikaliai, jam praėjus pro elektrinį lauką tarp dviejų įelektrintų l metrų ilgio plokštelių vakuume, kaip pavaizduota 10.K7 pav.

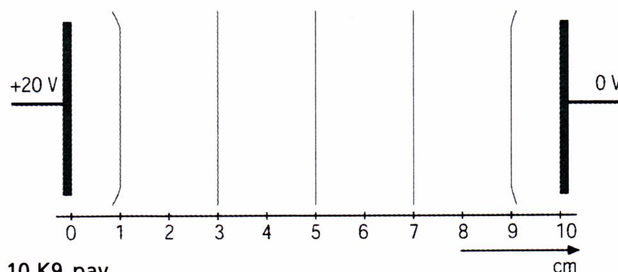


10.K7 pav.

Potencialų skirtumas V tarp nukreipiančiųjų plokštelių dvigubai didesnis. Konstatuokite ir paaiškinkite, kokį būtent poveikį, jei toks bus, šis pokytis turės:
a) jėgai, veikiančiai elektroną tarp plokštelių;
b) laikui, kuris reikalingas elektronui nukeliauti atstumą l;
c) vertikaliam poslinkiui s.

8
a) Moksleivei įteikiami šeši užantspauduoti nepermatomi maišeliai su vienodais šratais (jų skaičius skirtingas). Ji pasveria kiekvieną maišelį svarstyklėmis su lėkštele. Rodmenys yra šitokie: 30,8 g, 92,4 g, 61,6 g, 38,5 g, 77,0 g ir 53,9 g Apskaičiuokite šrato masę ir šratų skaičių kiekviename maišelyje.
b) Viename iš Milikeno bandymo variantų įelektrintos polistireno sferos buvo balansuojamos tarp dviejų horizontalių lygiagrečių plokštelių. Visų sferų masė buvo vienoda, tačiau jų krūviai skirtingi dėl skirtingo papildomų elektronų skaičiaus kiekvienoje sferoje. Šešioms skirtingoms sferoms buvo išmatuotos tokios įtampos: 400 V, 560 V, 240 V, 880 V, 720 V ir 640 V. Koks buvo mažiausias galimas papildomų elektronų skaičius kiekvienoje sferoje?

9 Nubrėžkite potencialo priklausomybės nuo atstumo grafiką, naudodamiesi informacija 10.K9 pav.



10.K9 pav.

a) Iš grafiko apskaičiuokite potencialo gradientą.
b) Koks yra lauko stipris? Kaip tai atitinka potencialo gradientą?

10
a) Apskaičiuokite poros elektrodų, iš kurių reikia padaryti 1 nF oro tarpo kondensatorių, plotą, jeigu elektrodai yra 0,1 mm atstumu vienas nuo

kito. Jei elektrodai pagaminti iš 2 cm pločio aliuminio folijos, kokio ilgio bus juostelės? (Elektrinė konstanta $\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\ C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$.)

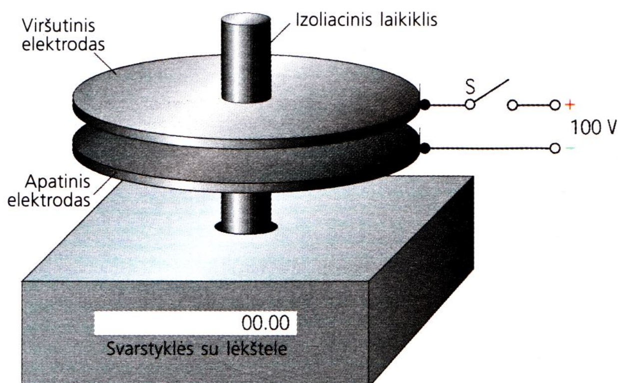
b) Tas kondensatorius įkraunamas iš 10 V šaltinio. Apskaičiuokite kondensatoriaus krūvį.

c) Apskaičiuotasis krūvis išmatuojamas naudojant kulonmetrą, kurio vidinė talpa 1 μF. Pakomentuokite tikslumą, kuriuo šis gali išmatuoti 1 nF kondensatoriaus krūvį.

d) Tarpas tarp elektrodų užpildomas popieriumi, kurio santykinė dielektrinė skvarba yra 2. Kokią tai turės įtaką juostelių ilgiui?

e) Praktikoje ilgos juostelės susukamos į cilindrą, ir antras popieriaus sluoksnis padengia viršutinį elektrodą, kad jiedu neliestų vienas kito. Tai atlikus nustatyta, kad išmatuotoji talpa didesnė už apskaičiuotąją vertę. Paaiškinkite, kaip padidėjo talpa.

11 Moksleivis viliasi išmatuoti jėgą tarp dviejų kondensatoriaus elektrodų. Jis vieną elektrodą padeda ant svarstyklių lėkštelės, o kitą elektrodą įtvirtina virš pirmojo izoliaciniu laikikliu, kaip pavaizduota 10.K11 pav.



10.K11 pav.

Elektrodai, kiekvienas $3{,}0 \times 10^{-2}\ m^2$ ploto, iš pradžių yra 10 mm nutolę vienas nuo kito. Apatinis elektrodas įžeminamas. 100 V nuolatinės srovės šaltinis kelioms sekundėms prijungiamas prie elektrodų, po to atjungiamas.

a) Apskaičiuokite:
(i) lygiagrečių elektrodų kondensatoriaus talpą, ir
(ii) energiją, sukauptą kondensatoriuje.

b) Galite įsitikinti, kad pakeitus tarpą tarp elektrodų 0,10 mm, sukauptoji elektros energija pasikeis 1,4 nJ.
(i) Iš čia apskaičiuokite traukos jėgą tarp elektrodų.
(ii) Ar tokią trauką galima būtų išmatuoti svarstyklėmis, skirtomis iki 10 mg masei? Pagrįskite savo atsakymą.

12 Du maži rutuliukai, kiekvienas 50 mg masės, pakabinti viename taške nailoniniais 0,8 m siūlais. Kai dviem rutuliukams suteikiamas vienodas krūvis, jie pajuda tiek, kad siūlas, laikantis kiekvieną rutuliuką, sudaro 5° kampą su vertikale. Pradžioje nusibraižykite diagramą, vaizduojančią visas veikiančias jėgas, ir tada apskaičiuokite kiekvieno rutuliuko krūvį. ($k = 9 \times 10^9\ N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$; $g = 9{,}8\ N \cdot kg^{-1}$.)

13 Apskaičiuokite stūmos jėgą tarp dviejų protonų, esančių 1 mm atstumu vienas nuo kito. Palyginkite šią jėgą su gravitacine traukos jėga tarp jų. (Protono masė $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg; protono krūvis $1{,}6 \times 10^{-19}$ C; $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$.)

14 Elektrinio lauko stipris šalia labai mažo įelektrinto kūno yra $150\ N \cdot C^{-1}$. Potencialas tame pačiame taške yra 300 V. Kiek toli nuo kūno buvo atlikti šie matavimai, ir koks yra to kūno krūvis?

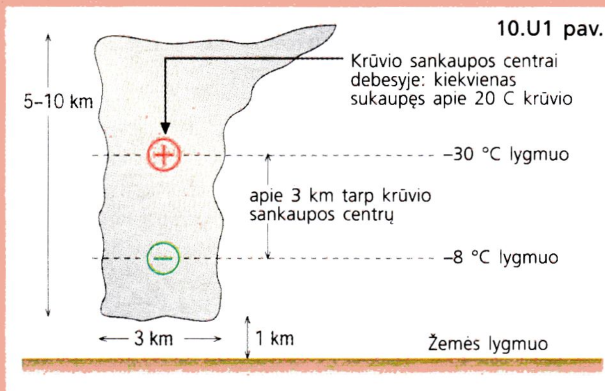
15 Alfa dalelių sklaidos eksperimente 5 MeV alfa dalelė kaktomuša susiduria su aukso branduoliu. Alfa dalelė „atšoksta“ atgal išilgai tos pačios trajektorijos. Apskaičiuokite artimiausią alfa dalelės priartėjimo prie aukso branduolio atstumą. (Aukso atominis numeris 79; alfa dalelės atominis numeris 2; elektrono krūvis $1{,}6 \times 10^{-19}$ C; $k = 9 \times 10^9\ N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$.)

Užduotis

ŽAIBAS

Audros debesis

Patyrinėkite tipišką audros debesį (10.U1 pav.).



Šitaip debesis laikosi apie 30 minučių, per kurias jis gali sukelti žaibo blyksnį netgi kas 20 sekundžių. Maždaug du trečdaliai visų blyksnių yra tarp krūvių debesyje, ne tarp debesies ir žemės. Kadangi kiekvienas blyksnis sunaikins didžiąją dalį to 20 C krūvio, debesis turi būti nuolatinis statinės elektros generatorius.

1

a) Kodėl manote, kad krūvio sritys debesies viduje bus *dvi:* viena neigiama ir viena teigiama?

b) Stebėjimai verčia manyti, kad audros debesies viduje pučia stiprūs vertikalūs vėjai. Kaip manote, kas gali sukelti šiuos vėjus?

c) Įsitikinkite, kad vidutinė srovė, kertanti kiekvienu žaibo smūgiu į žemę, yra maždaug trečdalis ampero.

Žaibo blyksnis

Esant sausam orui ir atmosferos slėgiui, elektriniuose laukuose virš 3×10^6 V · m^{-1} įvyks elektrinė iškrova. Vidutinis laukas po audros debesimi tėra apie 3×10^4 V · m^{-1}. Tai verčia manyti, kad sukuriant žaibo smūgį turi įtakos kiti veiksniai. Elektrinis laukas gali būti didesnis mažose debesies srityse. Vandens lašeliai jame tampa poliarizuoti; poliarizacija iškreipia jų formą ir jie tampa pailgi. Didesni lašeliai deformuojami lengviau, – jei yra keleto milimetrų skersmens lašelių, elektros išlydis gali įvykti 5×10^5 V · m^{-1} laukuose. Sykį prasidėjęs, žaibas tęsis debesyje, netgi laukams žemiau esant ir silpnesniems.

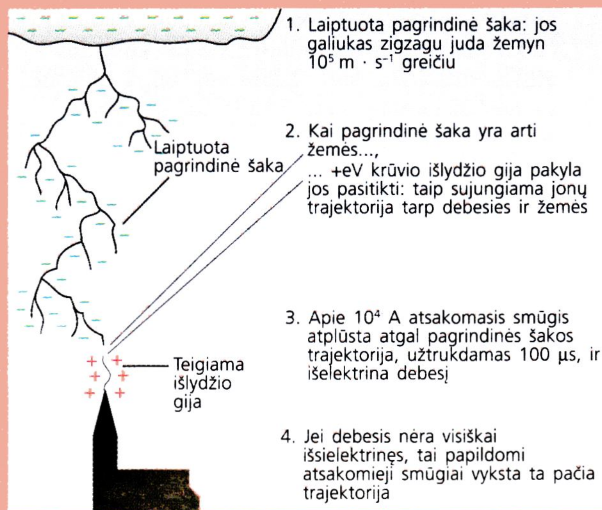
2

a) 20 C krūvio sritis pasklidusi 3 km skersmens debesies apačioje. Įvertinkite elektrinį lauką tarp debesies ir žemės.

b) Debesiui esant 1 km virš žemės, įvertinkite:
(i) potencialų skirtumą tarp debesies ir žemės ir
(ii) energiją, išsklaidomą atskiro išlydžio metu.

c) Kodėl poliarizuotas vandens lašelis leis prasidėti žaibui, kai laukas aplink jį mažesnis nei 3×10^6 V · m^{-1}?

Žaibo smūgis yra gana sudėtingas: patyrinėkite 10.U2 pav. Išlydis prasideda **laiptuota pagrindine šaka,** kurioje neigiamas krūvis juda nuo 10 iki 200 metrų laipteliais.



10.U2 pav. Žaibo smūgis

Smaigalio iškrovos srovės

Nuo to laiko, kai Bendžaminas Franklinas išrado žaibolaidį, sužinojome, kad gerai sukonstruotas žaibolaidis yra labai efektyvus, bet tik neseniai pradėjome suprasti, kaip jis veikia.

Jei elektrinis laukas pakankamai stiprus, tai atviras įžemintas metalinis strypas perduos atmosferai srovę. Tai vadinama **smaigalio iškrovos srove**, ir suteikia vieną būdą laidininkui išelektrinti debesį. Smaigalio iškrova būna, kai jėgos linijos šalia smaigalio yra pakankamai sutankėjusios, kad paspartintų elektronus iki tokio greičio, kurį pasiekę jie jonizuoja neutralias oro molekules susidūrimu.

3

a) Azoto atomui jonizuoti reikia apie 15 eV energijos. Kokiu greičiu turi judėti elektronas, suteikiantis šitiek energijos susidūrime?

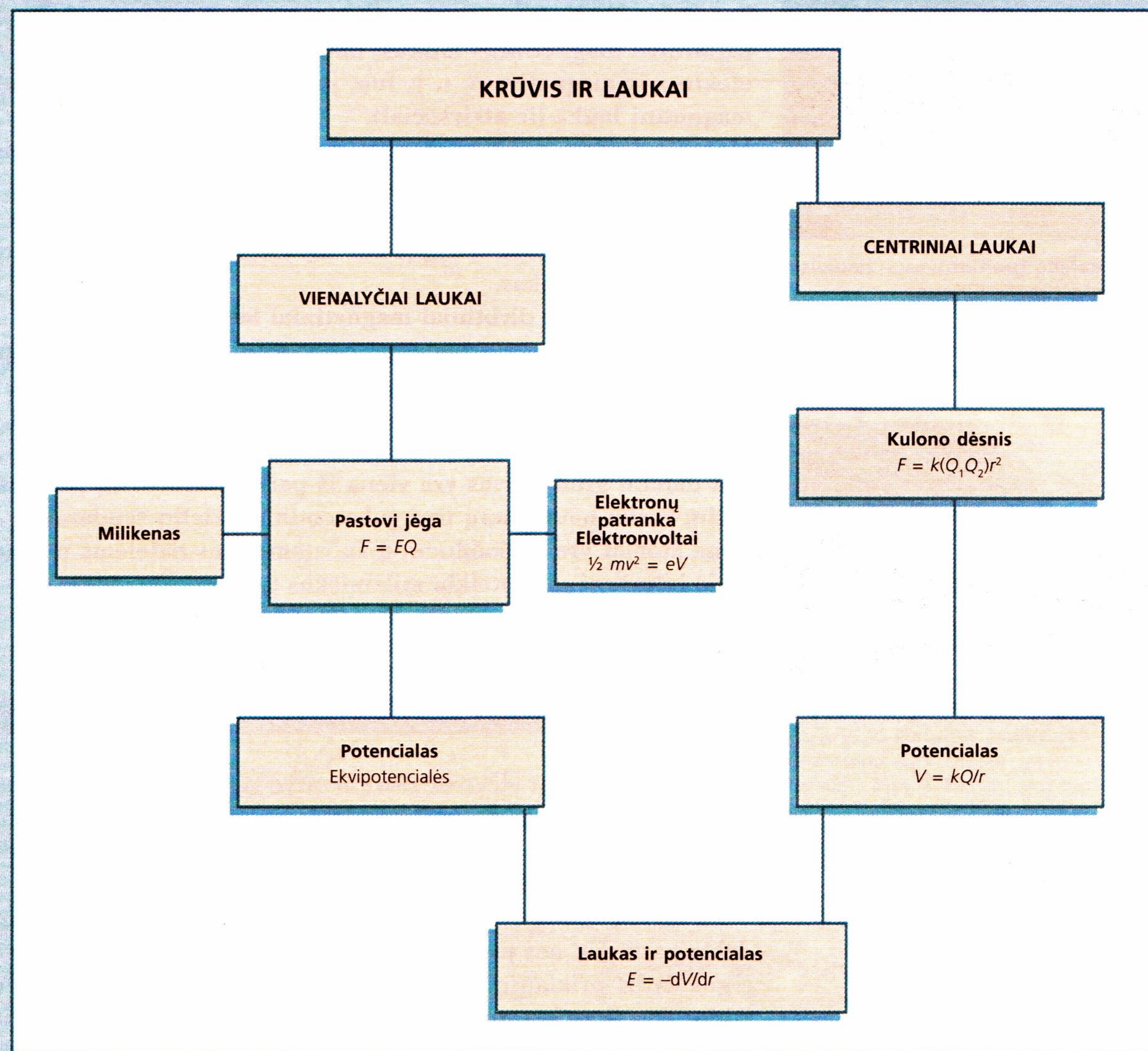
b) Įvertinkite elektrono pagreitį 3×10^6 V · m^{-1} lauke. Tariant, kad elektronas nesusiduria su kita dalele, kaip toli jis nukeliaus nuo rimties padėties, prieš įgydamas 15 eV energiją?

c) Kodėl tokia jonizacija vyks ties laidininko smaigaliu, kai vidutinis laukas po debesiu yra kur kas mažesnis nei 3×10^6 V · m^{-1}?

(Elektrinė konstanta $\varepsilon_0 = 9 \times 10^{12}$ C^2 · N^{-1} · m^{-2}; elektrono krūvis $1{,}6 \times 10^{-19}$ C; elektrono masė $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg.)

KRŪVIS IR LAUKAS

Šio skyriaus schema atspindi principus, kuriais grindžiamas krūvis ir jo sukeliamas elektrinis laukas, parodant, kaip susiję tie dydžiai. Galite naudotis šia schema tikrindamiesi savo turimas žinias pagal programą. Schema taip pat turėtų padėti jums nustatyti, ką tvirtai žinote, o kokias sritis reikėtų panagrinėti nuodugniau.

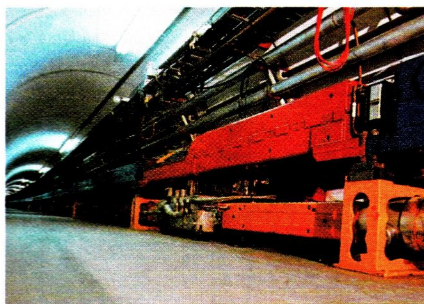


11 Elektromagnetizmas



E. Fermi dalelių greitintuvas – žiedinis 6,3 km ilgio tunelis Ilinojuje.

Dalelės perduoda didžiulę energiją tarp magnetų, apgaubtų mėlynu ir raudonu gaubtais



Žemė turi savo pačios magnetinį lauką, ir kai naudojamės kompasu, šis laukas mums pasitarnauja. Galime sukurti ir dirbtinius magnetinius laukus, naudodamiesi ryšiu tarp elektros ir magnetizmo, t. y. tuo, jog judantis krūvis sukuria magnetinį lauką (ir atvirkščiai).
Mes naudojame dirbtinį magnetinį lauką daugybėje kasdienių taikymų – pavyzdžiui, automobilio starterio variklyje ar elektronų pluoštelio, suteikiančio mums vaizdą televizoriaus ekrane, valdymui. Iš tikrųjų, kur tik yra elektros variklis, yra ir magnetinis laukas.
Mokslo pasaulyje dirbtiniai magnetiniai laukai turi svarbų vaidmenį. Masių spektrometras, pavyzdžiui, naudojamas cheminiams junginiams analizuoti, jonizuojant molekules ir rūšiuojant elektringus bandinius pagal masę. Norint juos išrūšiuoti, magnetinis laukas šias judančias skeveldras veikia jėga. Panašiai dalelių greitintuvas yra viena iš pačių svarbiausių įrangos dalių, fizikų naudojamų tirti subatominių dalelių sandarai. Jame atomai yra suskaldomi, o subatominėms dalelėms magnetinės kilmės jėgos suteikia milžiniškus greičius.

1 LAUKAI APLINK SROVES

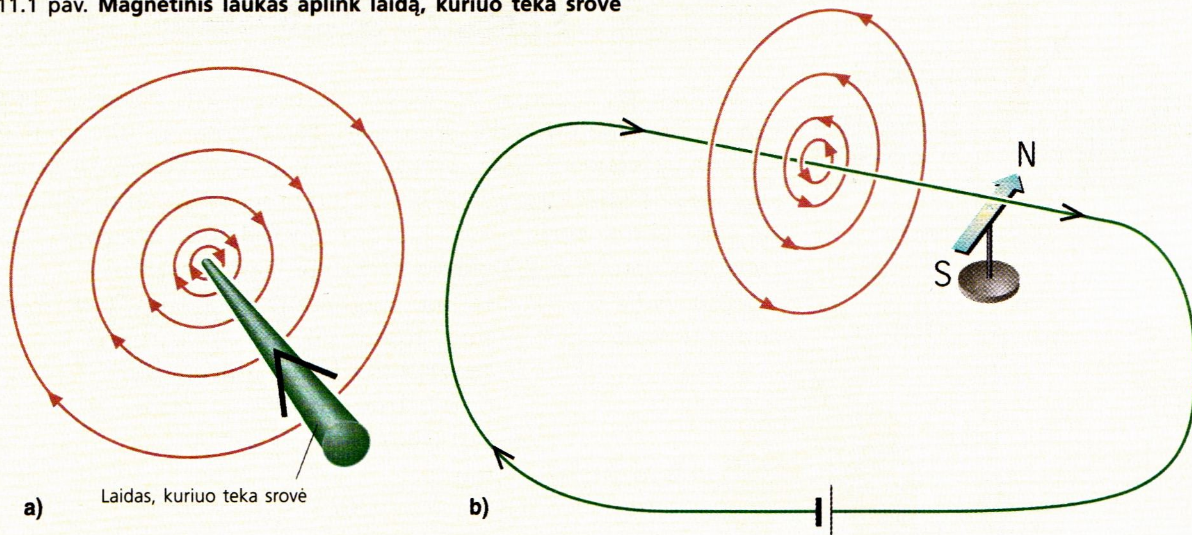
Jei leidžiame laidu elektros srovę ir prie jo priartiname kompasą, kompaso rodyklė (kuri yra stiprus magnetas) pasisuka (11.1 pav.). Taip yra dėl to, kad srovė sukuria aplink save magnetinį lauką, kaip kad nustatė Hansas Christianas Erstedas 1820 metais.

Ką turime galvoje, sakydami „magnetinis laukas“? Kompaso rodyklė pasisuka, nes ji yra veikiama jėgos. Tekant pastoviai srovei, jėgos dydis priklauso tik nuo to, kiek rodyklė yra nutolusi nuo laido: kuo ji arčiau, tuo jėga, veikianti rodyklę, didesnė, – tačiau rodyklė neprivalo liesti laido. Reiškia, magnetinis laukas veikia per atstumą. Taigi erdvę aplink laidą nusakome kaip turinčią magnetinį lauką. (Žr. 3 skyriuje, 17 p. daugiau apie magnetinio lauko sąvoką.)

Magnetinis laukas gali būti vaizduojamas „lauko linijomis“, rodančiomis lauko formą (žr. taip pat 10 skyrių). Brėžiame linijas arti viena kitos, jei norime pavaizduoti stiprų lauką, ir toliau viena nuo kitos – kai laukas silpnas.

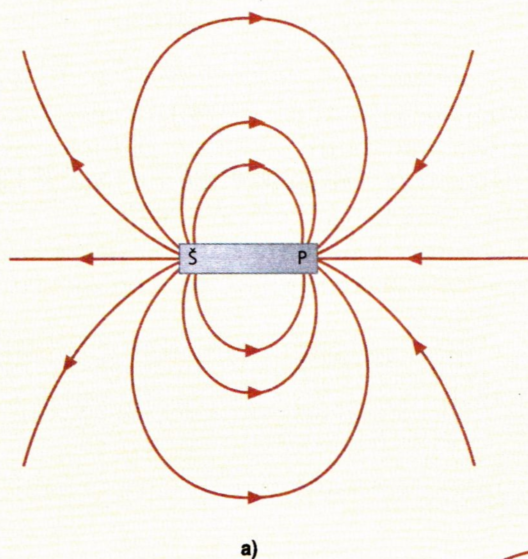
Tas laukas turi **veikimo kryptį.** Lauko kryptį taške apibrėžiame kaip kryptį jėgos, kuri veiktų ten esantį išskirtą šiaurės polių. (Iki šiol dar niekas nerado tokio dalyko kaip išskirtas šiaurės polius, – magnetiniai poliai visuomet sutinkami poromis, – tačiau tai naudinga sąvoka, padedanti apibrėžti lauko kryptis.) Magnetinis laukas yra vektorinis dydis.

11.1 pav. **Magnetinis laukas aplink laidą, kuriuo teka srovė**

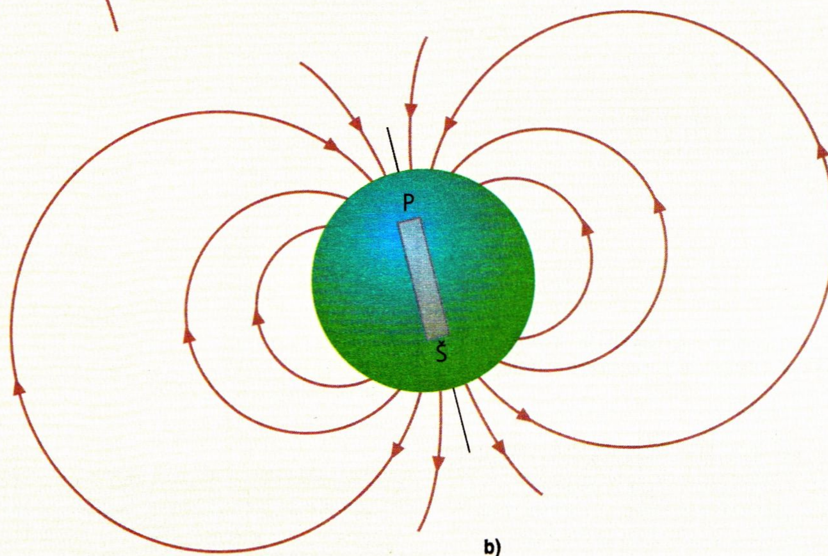


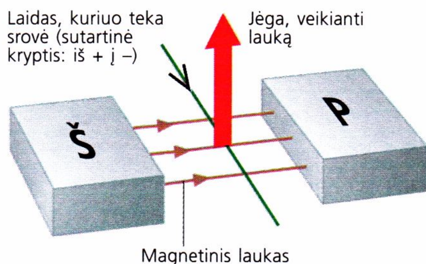
Lauko linijos visada yra uždaros kilpos. Magnetinio lauko kryptis yra iš šiaurės į pietus, kaip vaizduojama 11.2a) pav. Žemė turi savo magnetinį lauką, kuriuo jau seniai naudojamasi navigacijoje, – žr. 11.2b) pav.

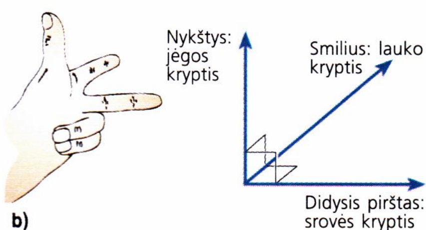
■ Žr. 1 klausimą.

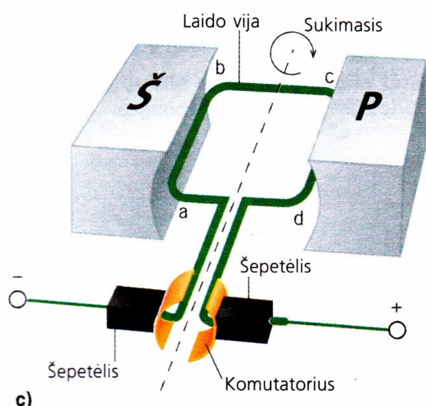


11.2 pav. a) **Magnetinis laukas aplink strypo formos magnetą.** b) **Žemės magnetinis laukas elgiasi taip, tarytum didelis strypo formos magnetas būtų Žemės viduje. Šio „magneto" pietinis polius yra nukreiptas link Žemės magnetinės šiaurės: kai kompasas rodo į šiaurę, jo šiaurinis polius yra traukiamas link Žemės „magnetinės šiaurės", kuri iš tikrųjų yra pietų polius! Kad tuo įsitikintumėte, atkreipkite dėmesį į magnetinio lauko linijų rodyklių kryptis** a) **ir** b)



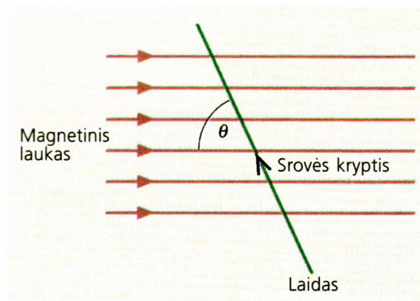






11.3 pav. **Flemingo kairiosios rankos taisyklė. a) Laidas, kuriuo teka srovė, magnetiniame lauke. b) Jėgos kryptis, numatyta pagal Flemingo taisyklę. Nykštys ir didysis pirštas yra puslapio plokštumoje, – smilius rodo į puslapį. c) Paprastas nuolatinės srovės variklis.**

Žr. 2 ir 3 klausimus. ■



11.4 pav. **Laidas su tekančia srove, pasuktas kampu θ į magnetinį lauką**

2 JĖGOS, VEIKIANČIOS LAIDUS, KURIAIS TEKA SROVĖ

11.3a) pav. atvaizduotas laidas, kuriuo teka srovė, pasuktas stačiu kampu į magnetinį lauką. Kaip parodyta 11.3b), galime numatyti jėgos, veikiančios laidą, kryptį, naudodamiesi **Flemingo kairiosios rankos taisykle.** Laidas linkęs judėti jėgos kryptimi. Šiuo ryšiu tarp laido, kuriuo teka srovė, ir jo judėjimo magnetiniame lauke pasinaudojama **elektros variklyje**, kaip 11.3c) pav.

Jėgos dydis F priklauso nuo magnetinio lauko stiprio B, srovės laide I ir laido lauke ilgio l. Kitaip sakant,

$F \sim B$, magnetinio lauko stipriui

$F \sim I$, srovei laide

$F \sim l$, laido lauke ilgiui

Tai gali būti išreikšta šitaip:

$$F = kBIl,$$

kur k yra konstanta.

Pasirenkame B vienetus taip, kad būtų $k = 1$, šitokiu būdu. Tarkim, magnetinio lauko stipris yra toks, kad 1 metro ilgio laidas, kuriuo teka 1 ampero srovė, patiria 1 niutono jėgą. Šitą lauko stiprį B apibrėšime kaip 1 niutoną amperui metrui ($N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$). Todėl turime:

$$1\ N = k \times (N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}) \times 1\ A \times 1\ m$$

Esant šioms sąlygoms, $k = 1$. Taigi

$$\boldsymbol{F = BIl}$$

Niutonas amperui metrui vadinamas **tesla** ir žymimas T. Maži magnetinio lauko stipriai matuojamai μT (mikroteslomis). Žemės magnetinis laukas svyruoja nuo 24 μT iki 66 μT. Didžiojoje Britanijoje jis yra apie 49 μT. Jėga, veikianti N vijų ritę, bus N kartų didesnė, nei veikianti vieną laidą, o būtent – $NBIl$.

Jėga F maksimali, kai laukas ir srovė yra statmeni vienas kitam (esant pastoviam magnetinio lauko stipriui). Jei kampas mažesnis, jėga sumažėja (11.4 pav.).

$$F = BIl \sin \theta$$

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite magnetinio lauko, kuris veiks laidą su 5 A srove 0,01 N metrui jėga, stiprį.

A

$$F = BIl \text{ arba } B = \frac{F}{Il}$$

$$B = \frac{0{,}01\ N}{5\ A \times 1\ m}$$

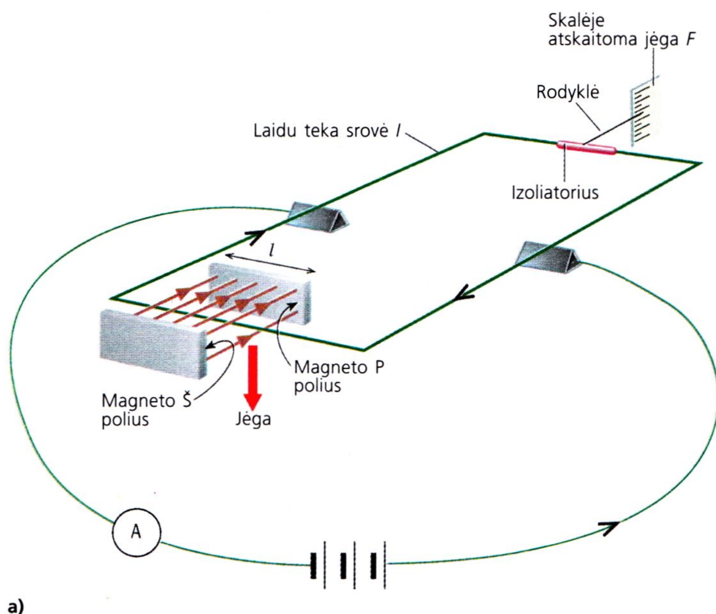
$$= 0{,}002\ N \cdot (A \cdot m)^{-1}$$

Lauko stipris = 2 mT

A Apskaičiuokite jėgą, veikiančią 100 m maitinimo kabelį, kuriuo teka 10 A srovė, 50 μT magnetiniame lauke.

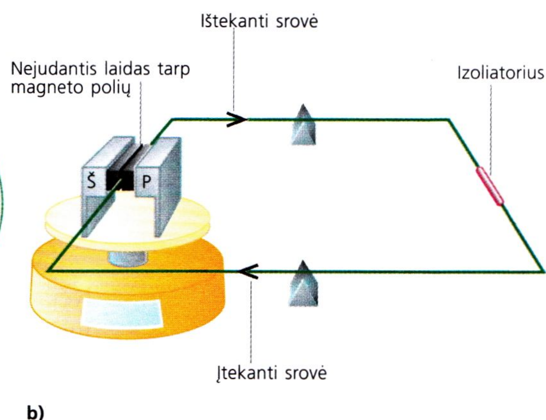
B Pažvelkite į 11.3c) pav. Pasinaudokite Flemingo kairiosios rankos taisykle, tikrindami laido dalių a–b ir c–d judėjimą. Nuoroda: pažvelkite ir į piešinį a).

Srovės svarstyklės



11.5a) pav. **Srovės svarstyklės laukui tarp dviejų magnetų matuoti**

11.5b) pav. **Svarstyklės su lėkštele laukui tarp dviejų magnetų matuoti. Laidą veikianti jėga išmatuojama kaip svarstyklių rodomas svoris**



Srovės svarstyklės, pavaizduotos 11.5a) pav., naudojamos magnetinio lauko stipriui matuoti. Išmatuojama jėga, veikianti žinomo ilgio laidą su žinoma tekančia srove nežinomame magnetiniame lauke, ir pasitelkiama nustatyti B – lauko stiprį, – naudojantis perrašyta lygtimi $F = BIl$:

$$B = \frac{F}{Il}$$

Jėga gali būti išmatuota, naudojant atsvarą ir skalę, kaip a), arba tiesiogiai, pasitelkiant jautrias svarstykles su lėkštele, kaip b).

(Žr. išnagrinėtąjį pavyzdį 248 p.)

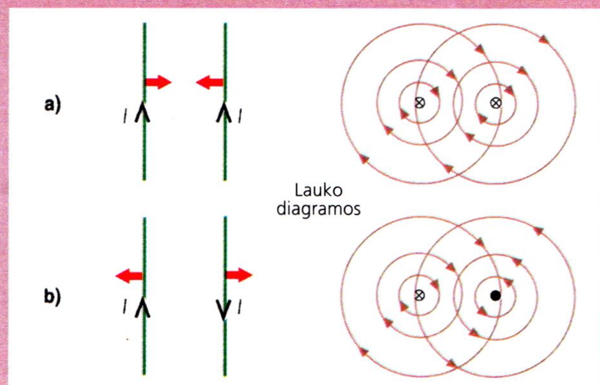
■ Žr. 4 klausimą.

?

C Atidžiai įsižiūrėkite į magnetinius laukus 11.6 pav. ir pasinaudokite Flemingo kairiosios rankos taisykle; įsitikinkite, kad laidus veikiančių jėgų kryptys yra teisingos.

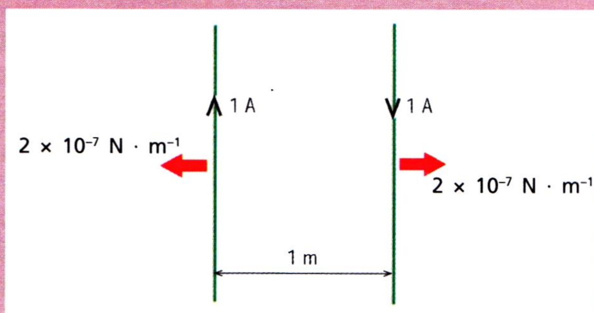
Amperas

Du laidai, kuriais teka srovės, irgi veikia vienas kitą jėgomis, kaip parodyta 11.6 pav.



11.6 pav. **Du laidai, kuriais teka srovės, yra veikiami vienas kito jėgų: a) vienos krypties srovės traukia, b) skirtingos krypties srovės stumia (srovės kryptis apatiniame dešiniajame laide: iš lapo aukštyn)**

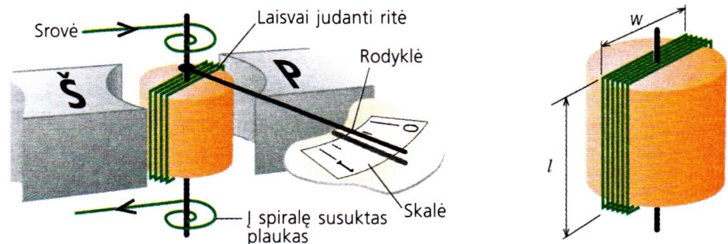
Elektros srovės vienetas, amperas, apibrėžiamas magnetinio poveikio išraiška, t. y. jėga tarp dviejų laidų, kurių kiekvienu teka 1 A srovė (11.7 pav.). Kai laidai yra lygiagretūs ir nutolę 1 m vienas nuo kito, jėga tarp jų turi būti 2×10^{-7} N (teoriškai, jei jie yra be galo ilgi). Tai yra jėga, naudojama amperui apibrėžti.



11.7 pav. **Ampero apibrėžimas**

3 JUDAMOSIOS RITĖS GALVANOMETRAS

Srovę laido ritėje galima išmatuoti naudojant judamosios ritės galvanometrą (11.8 pav.). Tiksliai kalbant, matuojama laido ritę veikianti jėga, o srovė apskaičiuojama remiantis šiuo matavimu.



11.8 pav. **Judamosios ritės galvanometras**

Lengva ritė pakabinta taip, kad galėtų judėti be trinties vienalyčiame magnetiniame lauke. Kai teka srovė, ritė pasisuka spiralinio plauko atžvilgiu. Spyruoklė įsitempia, iki jos tamprumo jėga susilygina su magnetine jėga, veikiančia ritę. Rodyklė, pritvirtinta prie ašies, pasisuka skalės atžvilgiu.

Magneto galai yra įgaubti: laukas yra visada statmenas cilindrui, ant kurio įtaisyta ritė, taigi judama ritė yra visada statmena magnetiniam laukui. Dabar panagrinėkime ritę, kuria teka I amperų srovė, magnetiniame B teslų lauke. Jei ritės šono ilgis yra l metrų, tai jėga, veikianti kiekvieną šoną, bus BIl. Šios dvi jėgos sukuria sukamąją jėgą, arba sukimo momentą, veikiantį kiekvieną ritės viją.

Kai plotis yra w metrų, sukimo momentą gauname šitaip:

$$\text{sukimo momentas} = BIl \times w \text{ (niutonmetrais)}$$

Kadangi $l \times w$ lygu ritės skerspjūvio plotui A, tai

$$\text{sukimo momentas} = BIA$$

Taip yra vienai laido vijai. Ritė turės N vijų. Todėl

$$\text{visas sukimo momentas} = NBIA$$

Spyruoklės kiekviename ritės gale, perduodančios srovę ritei, sukuria priešingą sukimo momentą, neleidžiantį ritei suktis. Spyruoklės sukimo momentas proporcingas kampui, kuriuo ji pasisuka. Ritė suksis tol, kol abu sukimo momentai susilygins. Taigi

$$\text{magnetinis sukimo momentas} = \text{spyruoklės sukimo momentas,}$$

$$NBIA = k\alpha,$$

kur k yra konstanta, o α kampas, kuriuo pasisukusi ritė. Iš čia matyti, kad kampas α yra proporcingas srovei I. Tai reiškia, kad skalė bus tiesinė, kadangi lygūs srovės pokyčiai sukels skalėje lygius pasisukimo pokyčius.

Matuoklių su judama rite palyginimas su skaitmeniniais matuokliais

Matuoklis su judama rite buvo laboratorijų „darbiniu arkliu" daugelį metų. Jis panaudojamas „judamos ritės" multimetruose. Tačiau dabar daugeliui tikslų jis pakeistas skaitmeniniais matuokliais, kurie paremti integrinių grandinių stiprintuvais. Juos naudojant kaip voltmetrus, šių varžos kur kas didesnės nei jų judamos ritės ekvivalentuose. Bet netgi tada judamos ritės matuokliai vis dar geresni kai kuriems tikslams, kaip antai kondensatoriaus įkrovos ar iškrovos kontrolei.

4 JĖGOS, VEIKIANČIOS ELEKTRINGAS PLUOŠTELIŲ DALELES

Televizinį vaizdą sukuria elektronų pluoštelis, valdomas magnetinių laukų. Pluoštelis sklinda skersai televizoriaus ekrano dideliu greičiu. Elektroniniuose osciloskopuose irgi naudojamas elektronų pluoštelis. Iš tikrųjų, Dž.Dž.Tomsonas tyrinėjo „katodinius spindulius" 1897 m. ir stebėjo, kaip elektriniai ir magnetiniai laukai juos veikia. Tomsonas įrodė, kad katodiniai spinduliai – tai mažytės neigiamai įelektrintos dalelės. Tai vyko dar keletą metų prieš pavadinant jas „elektronais", tačiau jų atradimas priskiriamas Tomsonui.

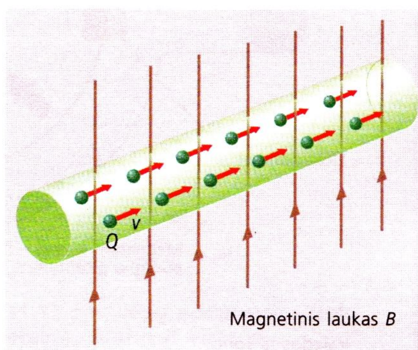
Elektros srovė laide yra elektringųjų dalelių srautas laide. Elektringųjų dalelių pluoštelis irgi yra srovė, – pavyzdžiui, elektronų pluoštelis yra srovė.

11.9 pav. atvaizduotas identiškų elektringųjų dalelių pluoštas, kiekviena dalelė turi Q kulonų krūvį ir juda vidutiniu v metrų per sekundę greičiu. Pluoštelis juda statmenai vienalyčiam magnetiniam B teslų stiprio laukui. Kai pluoštelio ilgis lauke yra l, ir dalelei reikia t sekundžių šį atstumą įveikti, tada

$$l = vt.$$

Jei pluoštelio ilgyje l yra N dalelių, tai dalelių, praeinančių pro lauko tašką, skaičius irgi yra N, ir todėl visas skaičius dalelių, praeinančių pro bet kurį tašką lauke per t sekundžių, yra nQ kulonų. Todėl srovė

$$I = \frac{NQ}{t}$$



11.9 pav. **Elektringųjų dalelių pluoštas magnetiniame lauke**

Jei dabar laikytume tą pluoštelį laidu, tai pasinaudodami $F = BIl$ gautume:

$$F = BIl$$
$$= B\frac{NQ}{t}vt$$
$$= BNQv$$

Tai yra jėga, veikianti N dalelių pluoštelį. Taigi jėga, veikianti pavienę dalelę,

$$F = \frac{BNQv}{N}$$

Suprastinę gauname tokią vieną dalelę veikiančią jėgą: $\boldsymbol{F = BQv}$

■ Žr. 5 ir 6 klausimą.

PAVYZDYS

K Televizorių kineskopuose magnetiniai laukai naudojami elektronų pluošteliui nukreipti. Elektronus emituoja kineskopo elektronų patranka 2×10^7 m · s^{-1} greičiu. Jie nukeliauja 20 cm horizontalų atstumą iki ekrano ir yra atlenkiami magnetinio lauko į šoną 10 cm atstumu.

Apskaičiuokite apytikslę magnetinio lauko, kuris įstengtų tai padaryti, stiprio vertę. (Elektrono masė = $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg)

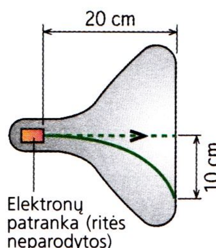
A

Laikas, kuris trunka, kol pasiekiamas ekranas

$$= \frac{0{,}2\ \text{m}}{2\times10^7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$$

$= 1 \times 10^{-8}$ s

Per šį laiką elektronai pagreitinami į šalį 10 cm atstumu s, esant pagreičiui a:



$$s = \frac{1}{2}at^2$$

$$a = \frac{2\times0{,}1\ \text{m}}{(1\times10^{-8}\ \text{s})^2}$$
$$= 0{,}2\times10^{16}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Reikalinga jėga: $F = ma$

$= (9{,}1 \times 10^{-31}) \times (0{,}2 \times 10^{16})$

$= 1{,}8 \times 10^{-15}$ N

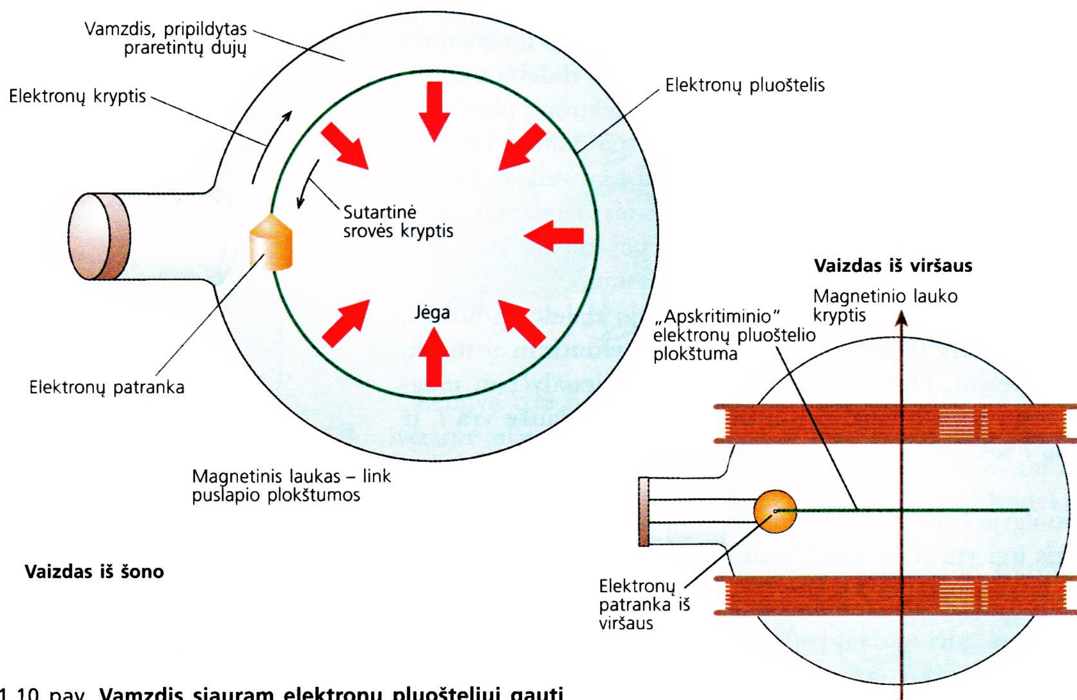
Iš $F = Bev$ gauname lauko stiprį $B = F/ev$.

$$\text{Todėl: } B = \frac{1{,}8\times10^{-15}}{(1{,}6\times10^{-19})\times(2\times10^7)}$$

$= 5{,}6 \times 10^{-4}$ (teslų)

Apytikslis magnetinio lauko stipris = 0,56 mT.

Elektronų e/m matavimas



11.10 pav. **Vamzdis siauram elektronų pluošteliui gauti**

Prietaisas 11.10 pav. vadinamas vamzdžiu siauram elektronų pluošteliui gauti, nors tai tiksliau lempa, nei vamzdis. Jame įtaisyta elektronų patranka, kuri siunčia elektronų pluoštą statmenai į išgaubtą ertmę. Kaip atvaizduota paveiksle, vamzdis montuojamas tarp dviejų ričių (vadinamų **Helmholco ritėmis**, – žr. 12 skyrių). Ritės sukuria vienalytį magnetinį lauką, kuris horizontalus ir statmenas elektronų pluoštui.

Kai iš elektronų patrankos išlekia elektronai, magnetinė jėga statmena ir jų judėjimo krypčiai, ir magnetinio lauko krypčiai. Kai kryptys tokios, kaip parodyta 11.10 pav., jėga yra link vamzdžio centro. Nukreipto į šalį elektronų pluošto judėjimo kryptis visada statmena laukui, o jėga visada nukreipta link vamzdžio centro. Todėl elektronai juda apskritimine trajektorija, o magnetinis laukas sukelia įcentrinę jėgą. Taigi naudojant lygtį $F = BQv$, išvestą 251 puslapyje (šiuo atveju $Q = e$, elektrono krūviui),

$$Bev = \frac{mv^2}{r},$$

kur r yra apskritiminės trajektorijos spindulys.

Elektronų patranka teikia daugiau informacijos apie elektronų energiją (žr. 10 skyrių, 232 p.):

$$eV = \frac{1}{2}mv^2$$

Išskyrus e, m ir v, visi kiti dydžiai šiose dviejose lygtyse, t. y. B, R ir V gali būti eksperimentiškai išmatuoti.

Šias dvi lygtis galima pertvarkyti ir gauti greitį v bei santykį e/m:

$$v = \frac{2V}{Br}$$

ir

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(Br)^2}$$

7 klausimas praplečia šių lygčių išvedimo aiškinimą.

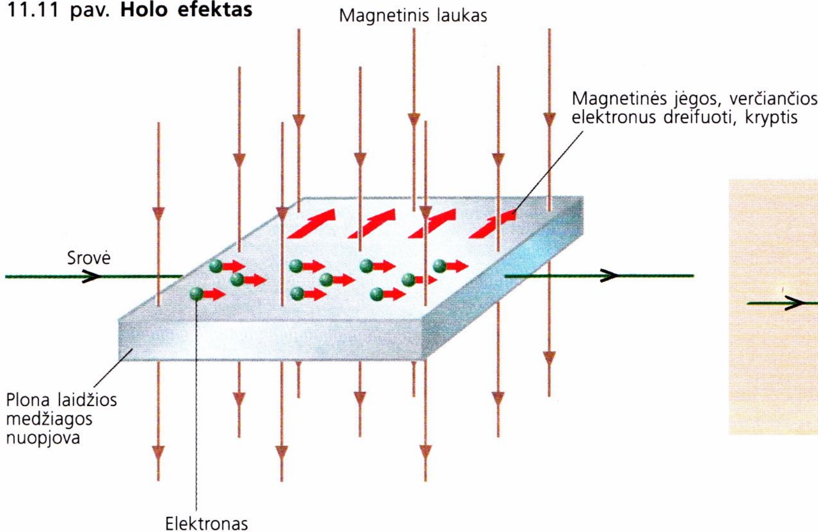
Elektronų e/m yra $1{,}76 \times 10^{11}$ C · kg^{-1}. Esant maždaug nuo 100 iki 200 V greitinančioms įtampoms, elektronų greitis yra apie 10^7 m · s^{-1}. Aukščiau aprašytuoju prietaisu gaunami rezultatai, panašūs į šiuos, gautus naudojant labai paprastą laboratorijos įrangą matavimams atlikti. Ampermetras ir svarstyklės su lėkštele reikalingi B matuoti, voltmetras – greitinančiai įtampai V išmatuoti, ir liniuotė – išmatuoti pluoštelio spinduliui r.

5 HOLO EFEKTAS

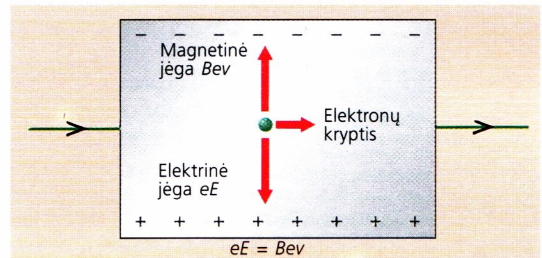
Lengvas būdas magnetiniams laukams išmatuoti yra panaudoti Holo zondą. Zondui naudojama maža integrinė grandinė, kurios išėjimo įtampa proporcinga magnetinio lauko stipriui. Šis „lustas" priklauso nuo efekto, 1879 m. atrasto E.H. Holo. Holo efektas teikia svarbios informacijos apie laidumą kietuosiuose kūnuose, taip pat apie krūvininkų greitį ir jų skaičių vienetiniame tūryje.

Jei elektringosios dalelės juda kietajame kūne, esančiame magnetiniame lauke, tai magnetinė jėga veikia jų judėjimą. 11.11 pav. atvaizduota laidžios medžiagos, kuria teka srovė, nuopjova. Magnetinis laukas veikia statmenai srovės krypčiai. Judantys elektronai jėgos stumiami link tolimojo plokštelės krašto. Jie negali palikti plokštelės ir todėl susitelkia jos pakraštyje.

11.11 pav. **Holo efektas**



11.12 pav. **Jėgų pusiausvyra Holo efekte, žiūrint iš viršaus**



Taigi 11.11 pav. magnetinė jėga priverčia elektronus dreifuoti nuo artimojo krašto link tolimojo krašto. Taip tolimasis kraštas įsielektrina neigiamai, o artimasis kraštas – teigiamai, tarp jų susidaro gradientas. Vienarūšiai krūviai vienas kitą stumia, taigi kai elektronai, kiekvienas e krūvio, susikaupia gale, susidaro E stiprio elektrinis laukas, kuris priešinasi šiam šoniniam elektronų judėjimui. Palaipsniui jėga, veikianti kiekvieną elektroną dėl elektrinio lauko (eE), visiškai kompensuoja magnetinę jėgą (Bev), kaip parodyta 11.12 pav.

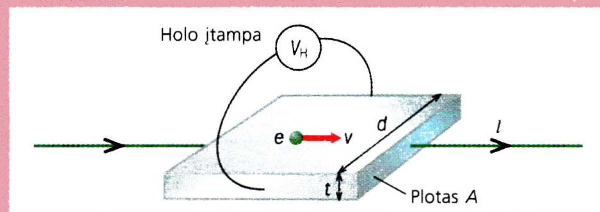
Krūviui kaupiantis ties tolimuoju kraštu, skersai nuopjovos susikuria įtampa. Ši įtampa vadinama **Holo įtampa.** Didžiausia Holo įtampa esti puslaidininkinėse medžiagose, kaip silicis ir germanis. Gerų laidininkų Holo įtampa daug mažesnė (papildymo intarpe bus paaiškinta to priežastis).

Iki šiol laikėme krūvininkus elektronais. N tipo puslaidininkiuose srovė tikrai yra dėl n tipo („negative" – *vert. past.*) elektronų judėjimo. Tačiau p tipo („positive" – *vert. past.*) puslaidininkiuose srovė yra dėl teigiamų „skylių" judėjimo (daugiau apie tai 2-oje knygos dalyje – 20 sk.). Elektronai juda link skylučių viena kryptimi, sukeldami skylučių atsiradimą priešinga kryptimi. Todėl aukščiau esantis aprašymas tinka n tipo puslaidininkiams, bet p tipo puslaidininkyje Holo įtampos poliškumas yra atvirkščias.

?

D Pritaikykite Flemingo kairiosios rankos taisyklę ir įsitikinsite, kad elektronų judėjimas 11.11 pav. yra teisingas. Jei srovė (ta pačia kryptimi) būtų dėl teigiamų skylučių, kurlink jos judėtų lauke? Kodėl yra apgręžiama Holo įtampa?

Veiksniai, įtakojantys Holo įtampą



11.13 pav. Kintamieji, veikiantys Holo įtampą

Pusiausvyra greitai pasiekiama, kai magnetinė jėga, veikianti elektronus, yra tiksliai atsveriama elektrinės jėgos:

$$eE = Bev$$

Tačiau elektrinio lauko stipris E gali būti išreiškiamas kaip Holo įtampa V_H, padalyta iš medžiagos plokštelės pločio d. Todėl

$$e = \frac{V_H}{d} = Bev$$

Iš čia gauname: $V_H = Bvd$

Elektronų greitis gali būti išvestas iš pernašos lygties (žr. 9 skyrių):

$$v = \frac{I}{nAe},$$

kur n yra krūvininkų skaičius kubiniame metre.

Lygtis Holo įtampai dabar tampa tokia:

$$V_H = \frac{BId}{nAe}$$

Galima dar labiau ją supaprastinti, kadangi $A/d = t$, plokštelės storiui. Taigi galutinė išraiška yra tokia:

$$V_H = \frac{BI}{nte}$$

Dabar aišku, kodėl puslaidininkinės medžiagos naudojamos Holo zondams. Krūvininkų skaičius n puslaidininkiuose yra daugybę kartų mažesnis nei gerame laidininke, tačiau tebėra pakankamai didelis, kad galėtų susidaryti pastebima srovė I. Maža n sukelia didelę Holo įtampą V_H. Izoliatoriai turi labai mažą n, ir vis tiek teka labai nedidelė srovė:

Puslaidininkių su priemaišomis $n \approx 10^{22}$ m^{-3}.

Tipiško metalo $n \approx 10^{28}$ m^{-3}.

Žr. 8 klausimą. ■

E 10 mm pločio ir 0,01 mm storio aliuminio pavyzdėlio viename kubiniame metre yra 2 × 10^{29} laisvųjų elektronų. 5 A srovė teka lustu, ir 2 T stiprio magnetinis laukas veikia statmenai pavyzdėlio paviršiui. (Aliuminio savitoji varža yra 2,7 × 10^{-8} Ω · m.)

Apskaičiuokite:

a) elektronų pavyzdėlyje dreifo greitį,

b) Holo įtampą tarp pavyzdėlio kraštų.

Kodėl svarbu, kad Holo įtampa būtų matuojama tarp dviejų taškų, kurie yra tiksliai vienas priešais kitą? Koks būtų efektas, jei tie kontakto taškai būtų nesutapdinti 0,1 mm?

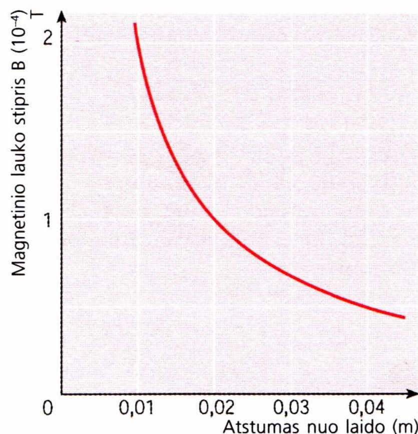
SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėtumėte sugebėti:

- Apibūdinti magnetinį lauką jo formos ir krypties požiūriu.
- Apibūdinti magnetinį lauką aplink laidą, kuriuo teka srovė.
- Matuoti magnetinio lauko stiprį teslomis (N · A^{-1} · m^{-1}).
- Pasinaudoti lygtimi $F = BIl$ jėgai, veikiančiai laidą su srove, apskaičiuoti.
- Aprašyti srovių balanso pritaikymą magnetinio lauko stipriui matuoti.
- Aprašyti magnetinių jėgų naudojimą tokiuose prietaisuose, kaip galvanometras su judama rite ir paprastas nuolatinės srovės variklis.
- Pasinaudoti lygtimi $F = BQv$ jėgai, veikiančiai judančią elektringąją dalelę vienalyčiame magnetiniame lauke.
- Aprašyti Holo efektą ir panaudoti Holo įtampą magnetinio lauko stipriui matuoti.

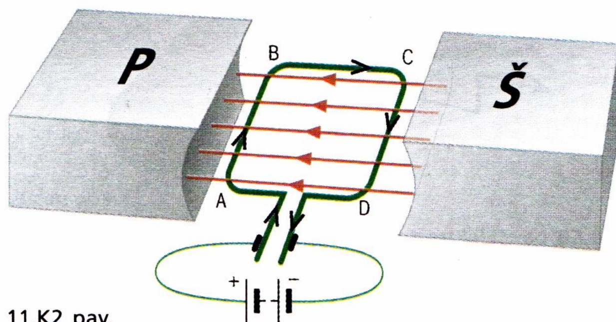
KLAUSIMAI

1 11.K1 pav. atvaizduotas magnetinio lauko stiprio *B* kitimas, keičiantis atstumui nuo ilgo laido, kuriuo teka pastovi srovė. Dešiniau grafiko mažas apskritimas su kryželiu vaizduoja laidą, statmeną puslapio plokštumai. Pasinaudokite informacija iš grafiko ir nubrėžkite magnetinį lauką aplink laidą. Jūsų brėžinyje turi būti parodytos bent keturios linijos. Kiekvieną liniją pažymėkite su ja susijusio magnetinio lauko dydžiu.



11.K1 pav.

2 11.K2 pav. atvaizduota ritė, patalpinta tarp magneto polių



11.K2 pav.

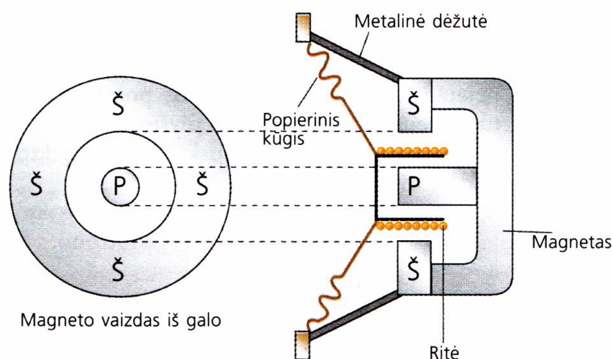
a) Kuria kryptimi jėga veiks kraštines **(i)** AB, **(ii)** BC ir **(iii)** CD? Kaip judės?

b) Kokią įtaką turės **(i)** srovės apgręžimas, **(ii)** magneto polių apgręžimas?

c) Ritė turi dešimt vijų ir yra 10 cm kraštinės ilgio kvadratas. Magnetinio lauko stipris yra 5 mT. Kai 2 A srovė teka rite, apskaičiuokite **(i)** jėgą, veikiančią kraštinę AB, **(ii)** ritę veikiantį sukimo momentą.

3 Šis klausimas yra apie garsiakalbį, pavaizduotą 11.K3 pav., kurį rengiamasi panaudoti radijo aparate. Štai jo duomenys:

Ritės skersmuo	–	25 mm
Vijų skaičius ritėje	–	240
B – lauko stipris	–	0,50 T
Kūgio ir ritės masė	–	30 g
Kūgio pakabos tamprumo konstanta *k*	–	$2{,}0 \times 10^4$ N · m^{-1}



11.K3 pav. **Garsiakalbis**

a) Apskaičiuokite garsiakalbio ritės laido ilgį.

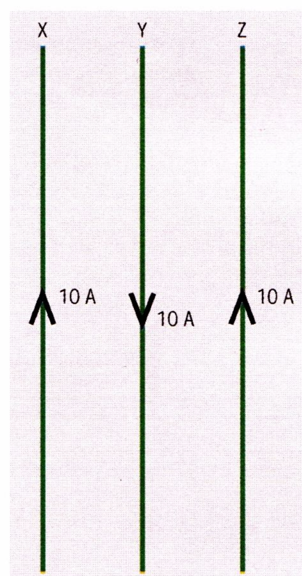
b) Šia rite teka pastovi 60 mA srovė.

(i) Įsitikinkite, kad ją veikianti jėga yra apie 0,6 N.

(ii) Apskaičiuokite poslinkį, sukeltą šios jėgos, nurodydami (visas) savo daromą(-as) prielaidą(-as).

4 11.K4 pav. atvaizduoti trys ilgi lygiagretūs vienodais tarpais išdėstyti, vienoje plokštumoje esantys laidai. Srovė kiekviename laide yra tokia pati, o jų kryptys yra parodytos brėžinyje.

11.K4 pav.



a) Palyginkite kiekvieną laidą veikiančių jėgų kryptis ir dydžius.

b) Kaip manote, kas pasikeistų, jei tokios pačios srovės visos būtų vienos krypties.

5

a) Vandenilio jonas, kurio masė *m* ir krūvis *q*, juda *v* greičiu *r* spindulio apskritimu magnetiniame lauke, kurio srauto tankis *B*.

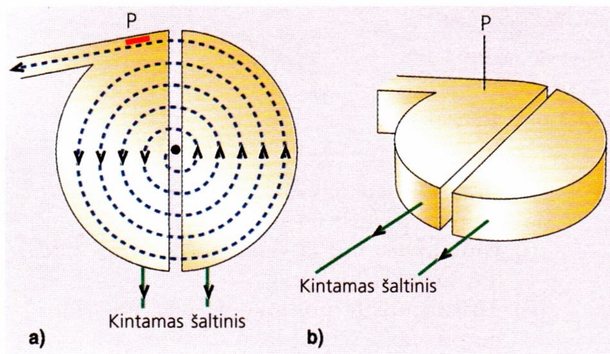
(i) Užrašykite lygtį, išreikštą tik šiais dydžiais, susiejančią joną veikiančias magnetines jėgas su reikalinga įcentrine jėga.

(ii) Išveskite, kad vienam jono apsisukimui reikalingas laikas *T* gaunamas pagal išraišką

$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

11.K5 pav. parodyta paprasto modelio dalelių greitintuvo, vadinamo **ciklotronu,** projekcija ir tūrinis vaizdas.

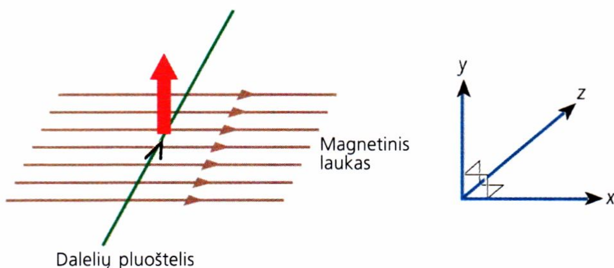
Jis sudarytas iš dviejų pusskritulio pavidalo dėžučių, vadinamų „dė“ pagal jų D formą. Vandenilio jonai tiekiami į prietaiso centrą. Besikeičiantis potencialų skirtumas turi greitinti jonus skersai plyšio tarp „dė“. Jonus, būnančius „dė“ viduje, pusapskritimio trajektorija verčia judėti magnetinis laukas, statmenas 11.K5a) pav. plokštumai. Įelektrinta plokštelė P galų gale ištraukia greitai judančius jonus iš ciklotrono.



11.K5 pav.

b) Tam tikro ciklotrono, greitinančio vandenilio jonus, laukas B yra 0,60 T.
(i) Apskaičiuokite laiko tarpsnį vienam vandenilio jono apsisukimui.
(ii) Kaip paaiškintumėte, kad dėl to, jog laiko tarpsnis nepriklauso nuo jono judėjimo greičio ir orbitos spindulio, ciklotroną paprasčiau eksploatuoti?

6 11.K6 pav. atvaizduota elektringa dalelė, z kryptimi patenkanti į vienalytį magnetinį lauką. Laukas nukreiptas x kryptimi, ir dalelė juda aukštyn y kryptimi. Koks yra dalelės krūvio ženklas?



11.K6 pav.

7 Siaurapluoščio vamzdžio bandyme elektronų krūvio ir masės santykiui (e/m) matuoti elektronų pluoštelis emituojamas iš elektronų patrankos, kurios potencialų skirtumas tarp anodo ir katodo yra V voltų.

a) Užrašykite lygtį elektronų, išlekiančių iš tos elektronų patrankos, kinetinei energijai ir išreikškite ją potencialų skirtumu V.

Tie elektronai išnyra į B teslų stiprio vienalytį magnetinį lauką statmenai lauko krypčiai. Jie juda r spindulio apskritimine trajektorija.

b) Užrašykite lygtį, susiejančią elektronus veikiančią magnetinę jėgą su išcentrine jėga, reikalinga apskritiminei trajektorijai.

c) Padalykite lygtį dalyje **b)** iš lygties dalyje **a)**, ir pamatysite, kad elektronų greitis gaunamas pagal lygtį

$$v = 2V/Br$$

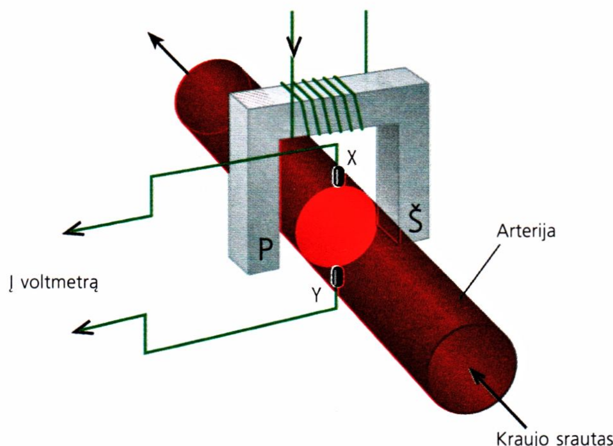
d) Įrašę šią vertę vietoj v į bet kurią lygtį iš dalių **a)** ar **b),** įsitikinkite, kad krūvio ir masės santykis gaunamas iš lygties

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2r^2}$$

e) Apskaičiuokite v ir e/m vertes, panaudodami šiuos duomenis:

V = 200 V, r = 4 cm, B = 1,2 mT.

8 Kraujyje yra ištirpusių jonų. 11.K8 pav. atvaizduotas modelis, naudojamas elektromagnetinio srautmačio principui demonstruoti; srautmatis naudojamas kraujo srauto arterijoje greičiui matuoti pagal jonų judėjimo greitį.



11.K8 pav. **Elektromagnetinis srautmatis**

Kai elektromagnetu sukuriamas 2,0 T magnetinis laukas, susidaro 600 μV potencialų skirtumas tarp dviejų elektrodų, X ir Y. Arterijos skerspjūvio plotas yra $1{,}5 \times 10^{-6}$ m². Elektrodus skiriantis atstumas yra $1{,}4 \times 10^{-3}$ m.

a) Užrašykite jėgos, veikiančios kraujyje esantį joną, judantį statmenai magnetiniam laukui, išraišką. Apibrėžkite vartojamus simbolius.

b) Jono krūvis yra $1{,}6 \times 10^{-19}$ C. Parodykite, kad joną veikianti jėga dėl elektrinio lauko tarp X ir Y yra $6{,}9 \times 10^{-20}$ N.

c) Kai joną veikiančios elektrinė ir magnetinė jėgos yra vienodo dydžio ir priešingos, susidaro 600 μV potencialų skirtumas. Iš čia apskaičiuokite:
(i) kraujo greitį arterijoje
(ii) kraujo kiekį, pratekantį arterija kiekvieną sekundę.

Užduotis

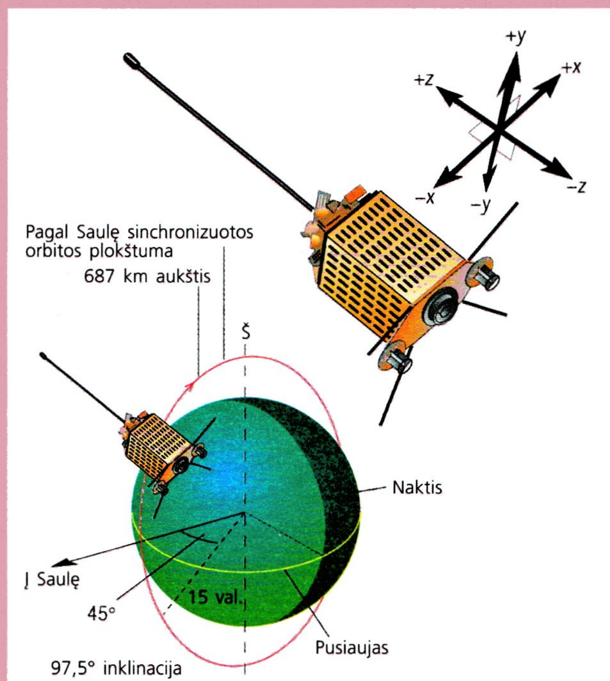
ŽEMĖS MAGNETINIS LAUKAS

Be regimosios šviesos, Saulė skleidžia elektromagnetinį spinduliavimą plačiame dažnių diapazone, tarp jų ir ultravioletinius bei Rentgeno spindulius. Dėl ultravioletinių spindulių susidaro jonosfera, t. y. jonizuotų atmosferos molekulių zona, besitęsianti maždaug nuo 40 km iki maždaug 300 km virš Žemės ir sumažinanti šios paviršių pasiekiantį ultravioletinių spindulių srautą.

Saulė skleidžia ir elektringas daleles, daugiausia pozitronus ir elektronus, kurie mus pasiekia vadinamuoju „Saulės vėju": magnetinis laukas apie Žemę labai padeda mums nuo jo apsisaugoti. Lauko stipris ir kryptis ties Žemės paviršiumi gali būti lengvai išmatuoti, tačiau tik dabar, kai jau turime nuotolinio registravimo palydovus, galime išmatuoti lauką aplink Žemę toli kosmose.

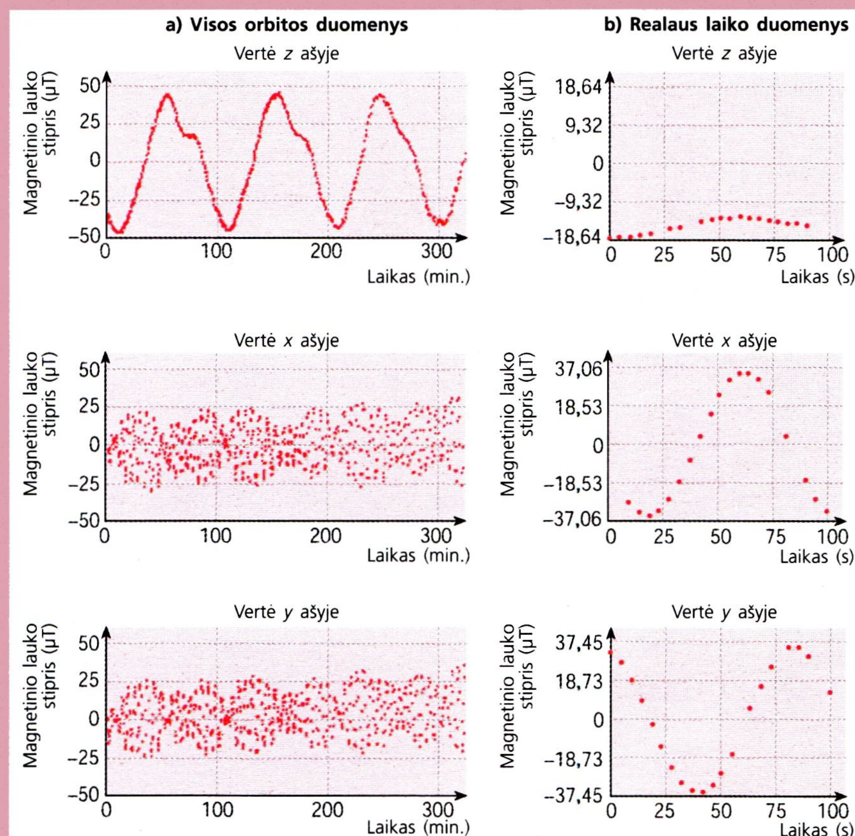
1984 metais Sari (*Surrey*) universitetas paleido UOSAT 2 (vadinamą ir OSCAR 11 vardu). Jis keliauja poline orbita aplink Žemę 98 minučių periodu vidutiniame 687 km aukštyje, t. y. virš jonosferos.

UOSAT 2 detektoriai matuoja įvairias erdvės aplink Žemę savybes, tarp jų temperatūrą, šviesos intensyvumą, spinduliavimo intensyvumą ir magnetinio lauko stiprį.



11.U1 pav. **UOSAT 2 ir jo orbitos geometrija**

Palydove yra trys magnetinio lauko detektoriai, po vieną kiekvienoje palydovo plokštumoje (11.U1 pav.). Jis taipogi renka ir perduoda duomenis dviem būdais. Duomenys iš detektorių perduodami „gyvai" (realaus laiko režimu – *vert. past.*), ir tuo būdu priėmimo stotys Žemėje gali kontroliuoti rodmenis realiame laike. Duomenys taipogi renkami ir išsaugomi paties palydovo viduje. Tai periodiškai transliuojama į Žemę kaip „visos orbitos duomenys" (VOD). 11.U2 pav. vaizduojami realaus laiko ir visos orbitos duomenų pavyzdžiai. Horizontalioje ašyje visuose grafikuose atidėtas laikas, tik – minutėmis VOD grafikuose, sekundėmis – realaus laiko duomenų grafikuose.

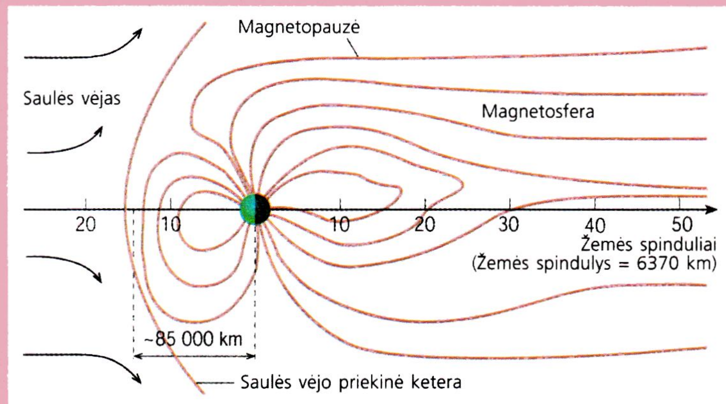


11.U2 pav. **UOSAT duomenys**

1 klausimas yra apie VOD duomenis; 2 klausimas yra ir apie VOD, ir apie realaus laiko duomenis.

1

11.U3 pav. **Saulės vėjas iškraipo Žemės magnetinį lauką**



a) Kaip VOD duomenų grafikas „vertė *z* ašyje" patvirtina palydovo periodą?
b) Kodėl magnetinio lauko poliškumas *z* ašyje palydovo orbitos metu kinta?
c) Padarykite 11.U3 pav., – Saulės vėjo brėžinio – eskizą, ir papildykite rodyklėmis, vaizduojančiomis Žemės magnetinio lauko kryptį.
d) Pažymėkite savo brėžinyje tą vietą orbitoje, kur manote „vertę *z* ašyje" esant didžiausią.
e) Kuriuo metu palydovas kerta magnetinį pusiaują?

2

a) Iš VOD ir realaus laiko grafikų įvertinkite palydovo apsisukimo apie savo *z* ašį periodą.
b) Kodėl VOD brėžiniai *x* ir *y* ašims yra sudėtingesni nei *z* ašies brėžinys?

Saulės vėjas yra dalelių iš Saulės, kurios Žemės atmosferą pasiekia judėdamos maždaug 400 km · s^{-1} greičiu, srautas. Šis elektringųjų dalelių mišinys, dar vadinamas **plazma,** susiduria su išoriniais atmosferos jonosferos sluoksniais, kur temperatūra gali siekti keletą tūkstančių kelvinų.

Saulės vėjas ypatingas tuo, kad jis dalį magnetinio lauko Saulės paviršiuje nusineša su savimi, per tarpplanetinę erdvę link Žemės. Kai Saulės vėjas pasiekia Žemę, šie magnetiniai laukai sąveikauja, ir Žemės magnetinis laukas iškraipomas: kaip parodyta 11.U3 pav., jis suspaudžiamas dieninėje pusėje, su labai pailgėjusia uodega naktinėje pusėje (toliau nuo Saulės).

Žemės laukas yra izoliuotas srityje, vadinamoje **magnetosfera.** Ta šios srities riba, kuri susitinka su Saulės vėju, yra vadinama **magnetopauze.**

11.U4 pav. **„Aurora borealis" – Šiaurės pašvaistė – sukuriama, kai greitas elektringųjų dalelių srautas iš Saulės sąveikauja su Žemės atmosfera**



Žemės magnetinis laukas aukštose platumose (prie polių) atveria kelią kai kurioms Saulės vėjo dalelėms patekti į Žemės atmosferą. Elektronai, pagreitinti net iki 10 keV, keliauja žemyn pagal lauko linijas. Jie sąveikauja su neutraliomis dujų molekulėmis atmosferoje maždaug 400–500 km aukštyje ir sukuria įspūdingąsias „aurora borealis" (Šiaurės pašvaistę) ir „aurora australis" (Pietų pašvaistę), kaip parodyta 11.U4 pav.

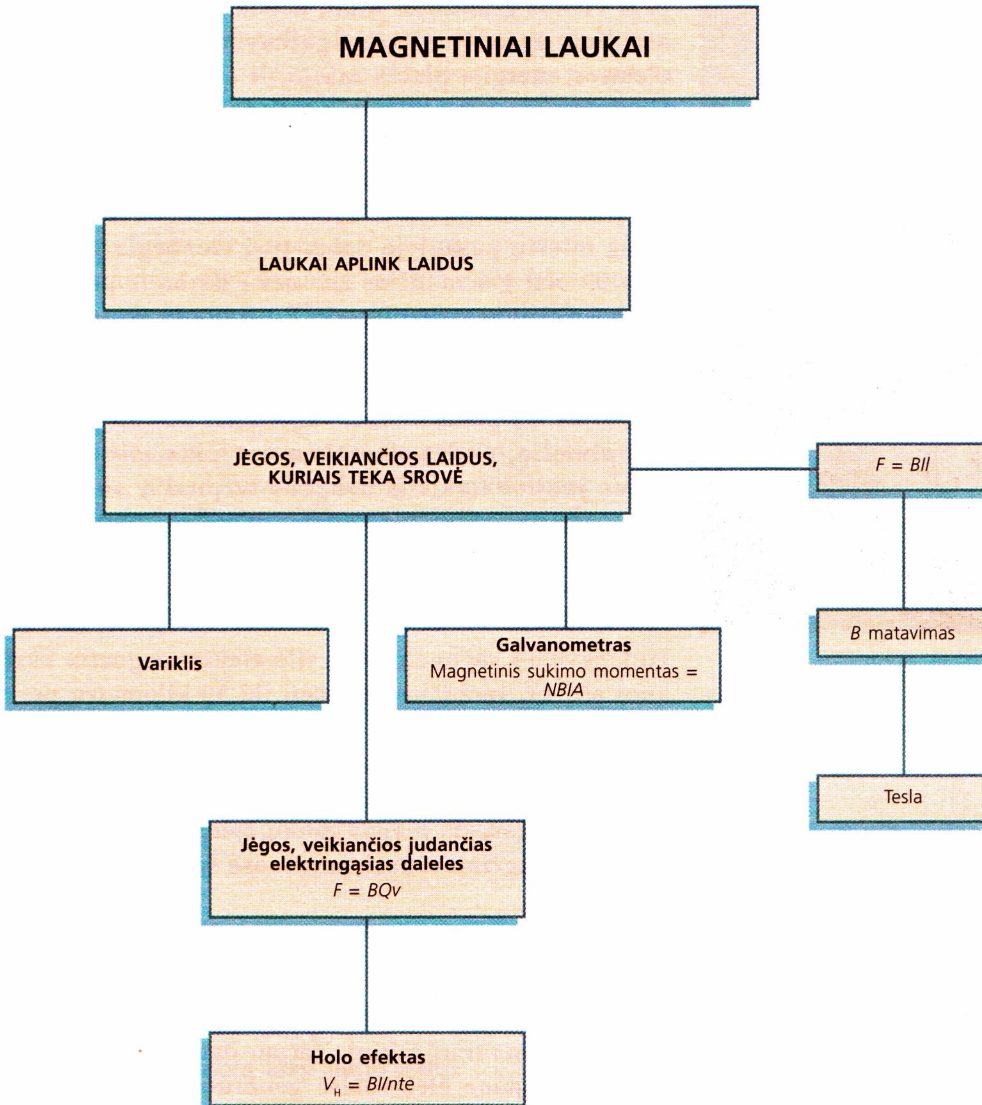
Elektromagnetinis spinduliavimas iš Saulės, taip pat ultravioletiniai ir Rentgeno spinduliai, įsiskverbia į magnetosferą ir jonizuoja atomus viršutiniuose atmosferos sluoksniuose, sukurdamas laisvųjų elektronų ir jonų sluoksnį **jonosferoje**.

3

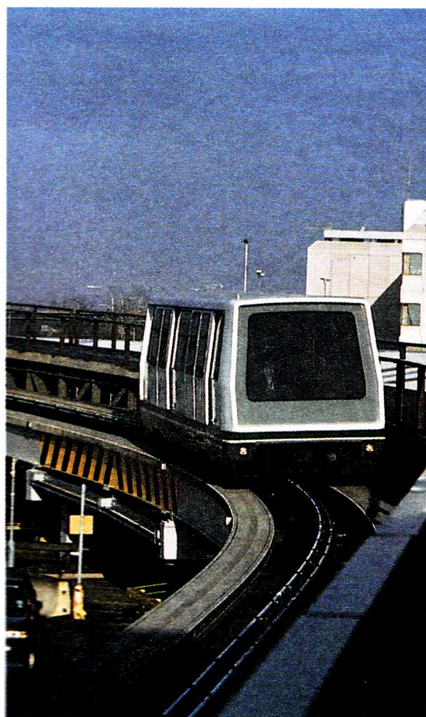
a) Kodėl Rentgeno ir ultravioletiniai spinduliai geba prasiskverbti į magnetosferą?
b) Padarykite 11.U3 pav. eskizo kopiją ir joje nubrėžkite kelią, kuriuo keliautų tokios dalelės, įeidamos į Žemės atmosferą polių srityse.
c) Kai elektringosios dalelės Saulės vėjyje pereina į Žemės lauką, jos dažnai sudaro su lauku mažesnį nei 90° kampą. Nubrėžkite schemą, parodančią, kaip šitos dalelės judės lauke. (Laikykite lauką mažame tūryje vienalyčiu ir pavaizduokite lauko linijas kaip vienodai nutolusias lygiagrečias tieses.)
d) Kaip paaiškintumėte švytėjimą, skleidžiamą pašvaistės pavidalu.
e) Jonosfera veikia kaip veidrodis kai kurių elektromagnetinių bangų atžvilgiu. Apibūdinkite kokį nors šio reiškinio taikymą.

ELEKTROMAGNETIZMAS

Schemoje pateiktos svarbiausios sąvokos, aprašytos šiame skyriuje, parodant jų ryšį su judančių elektringųjų dalelių kuriamais magnetiniais laukais. Pasinaudokite šia schema mokydamiesi ir tikrindami savo žinias pagal programą ir įtvirtinkite esminius principus, kuriuos turite suprasti.



12 Elektromagnetinė indukcija



Getviko aerouosto vienbėgiu geležinkeliu vežiojami keleiviai tarp galinių stočių

FARADĖJUS 1831 METAIS ATRADO elektromagnetinę indukciją, kuri suteikė jam galimybę perduoti elektros energiją iš vienos grandinės kitai, keičiant magnetinį srautą. Šiuo atradimu Faradėjus atvėrė galimybes gaminti bei paskirstyti elektros energiją plačiu mastu, ir šitaip buvo pertvarkytos visuomenė ir pramonė, nes atsirado galimybė perduoti elektros energiją namams ir fabrikams, esantiems toli nuo jos šaltinio. Net daugiau nei po 150 metų dar tebesugalvojami nauji elektromagnetinės indukcijos taikymai.

Daug miestų pasaulyje dabar turi vienbėgio transporto sistemas, nuolat gabenančias žmones į darbą ir parduotuves. Tačiau Čikagos priemiestyje Rouzmonte ši priemonė dar toliau plėtojama, diegiant naujausius tiesinių indukcinių variklių patobulinimus.

Štai koks tas planas. Maži vagonėliai be vairuotojų, valdomi kompiuterio, riedės siaurais nukreipiančiais keliais vienos eismo juostos tinkle iš daugelio tarpusavy susijungiančių kilpų. Žmonės atvyks į stotelę, nurodys kompiuteryje stotelę, į kurią nori nukeliauti, ir per 2–3 minutes atvyks vagonėlis jų ten nuvežti. Priemiestyje niekur nebus toliau nei 400 metrų nuo stotelės.

Po kiekvienu vagonėliu bus eilė elektromagnetų, kurie indukuos sroves, varančias vagonėlį iki 50 kilometrų per valandą greičiu. Vagonėlį galima stabdyti, tiesiog apgręžiant magnetinio lauko kryptį. Projektas kuriamas, kad patrauktų žmones atsisakyti automobilių ir daugiau naudotis viešuoju transportu. Jei bus sėkmingas, šis planas galėtų žymiai sumažinti transporto kamščius pagrindiniuose miestuose ir didmiesčiuose.

Įžanga

Daug elektrinių prietaisų, ypač – nešiojamųjų, naudoja baterijas kaip savo energijos šaltinį. Tačiau daugiausia savo elektros reikmėms vartojame elektrinėse generuojamą elektrą. Elektros paskirstymą elektrinės grindžia **elektromagnetinės indukcijos** principu.

Šiuolaikinės elektrinės pajėgia gaminti daug megavatų elektros energijos – D. Britanijos elektros energijos gamyba dabar viršija 50 gigavatų (5×10^{10} vatų). Elektromagnetinė indukcija naudojama ne vien elektrinėse. Mašinų spidometruose irgi pritaikytas šis principas, o indukcinis šildymas plačiai naudojamas pramonėje. Kai kurios viryklės indukuoja kaitinimo srovę po šildomais pagrindais. Dauguma pasaulyje naudojamų variklių yra indukciniai, nuo mažo ekranuotų polių varikliuko magnetofonuose be stiprintuvų iki didelių galingų variklių, naudojamų siurbliuose, – chemijos pramonės „darbinių arklių“.

1 KAS YRA ELEKTROMAGNETINĖ INDUKCIJA?

Maiklo Faradėjaus atradimai devynioliktojo amžiaus pradžioje atvėrė galimybes plataus masto elektros energijos gamybai. 1831 metų rugpjūčio 29 d. data pripažįstama „elektros pramonės gimimo diena“, – tądien Faradėjus atrado elektromagnetinę indukciją. Jis nustatė sąryšį tarp elektros ir magnetizmo, įrodęs, kad priartinus magnetą prie laidininko (metalinio laido), atsiranda elektros srovė.

Tą paliudija paprasti bandymai. Magnetas įkišamas ir ištraukiamas iš ritės prijungtos prie galvanometro, kaip parodyta 12.1a) pav., ir stebima srovė, magnetui judant (arba, jei magnetas nejudomas, judant ritei). Laidas, judantis magnetiniame lauke, duoda tą patį rezultatą; tai atvaizduota 12.1b) pav.

Faradėjaus bandymai atvedė ir iki pirmojo paprasto **transformatoriaus**. Jis suvyniojo dvi rites ant metalinio žiedo (12.2 pav.). Viena – pirminė – ritė buvo prijungta prie baterijos, o antroji ritė – prie galvanometro. Galvanometras rodydavo srovę antrinėje ritėje, tik įjungiant arba išjungiant srovę iš baterijos, t. y. tik tuomet, kai maitinama srovė ir, vadinasi, magnetinis laukas, *kisdavo*.

Taigi srovė indukuojama, kai tik uždaros grandinės laidas juda magnetiniame lauke, arba kai laukas kinta laido atžvilgiu.

Pateiksime komentarus, kurie padės suprasti svarbiausius teiginius (žr. 12.3 pav.):

- Standus tiesus l m ilgio laidas juda v greičiu statmenai vienalyčiam B teslų stiprio magnetiniam laukui.

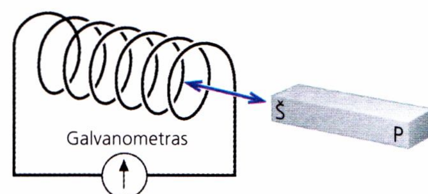
- Elektronus judančiame laide veikia jėga (Bev, kur e yra krūvininko krūvis, žr. 252 p.), todėl laisvieji elektronai juda link laido galo X. Jiems besikaupiant X, taip pat stiprėja elektrinis laukas, besipriešinantis elektronų judėjimui (lygiai kaip ir esant Holo efektui, žr. 253 p.).

- Galų gale elektrinė jėga tampa lygi magnetinei jėgai:
$$eE = Bev,$$
kur E yra elektrinio lauko stipris (žr. 232 p.). Galime užrašyti:
$$E = V/l,$$
kur V yra įtampa, indukuota tarp laido galų.

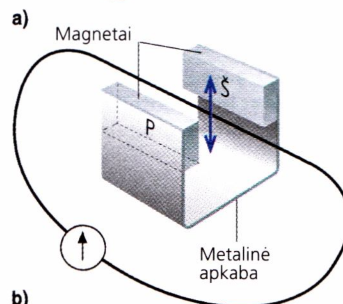
- Ši „įtampa“ yra indukuota elektrovara, kadangi laidui judant lauke atskiriamas krūvis.

- Apibendrindami galime teigti, kad
$$eV/l = Bev$$
arba
$$\boldsymbol{V = Blv}$$

- Taigi indukuotoji elektrovara V yra proporcinga magnetinio lauko stipriui B, laidininko ilgiui ir jo judėjimo greičiui. (Atkreipkite dėmesį, kad jei laidininkas su lauku sudaro kampą θ, tai indukuotoji įtampa yra $V = Blv \sin \theta$.)

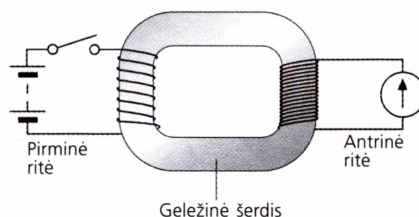


a)

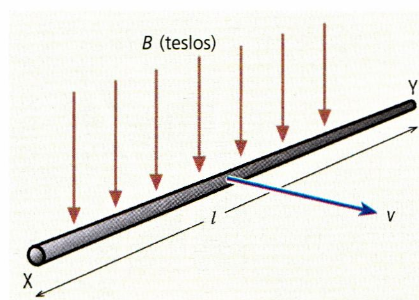


b)

12.1 pav. a) **Srovė atsiranda, kai magnetas įkišamas ir ištraukiamas iš ritės.** b) **Tas pats rezultatas gaunamas judinant laidą magnetiniame lauke**



12.2 pav. **Kai srovė pirminėje ritėje įjungiama ar išjungiama, galvanometras rodo srovę antrinėje ritėje**



12.3 pav. **Standus tiesus laidas XY, judantis v greičiu B teslų stiprio magnetiniame lauke**

?

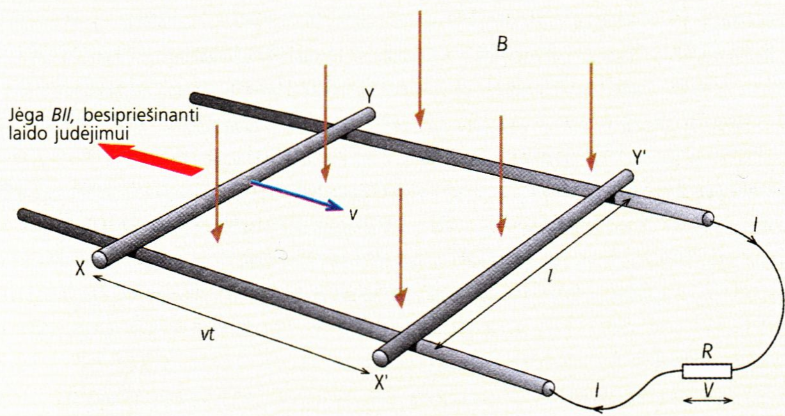
A 10 cm ilgio laidas juda 5 m · s^{-1} greičiu 1 T magnetiniame lauke, kirsdamas lauką stačiu kampu. Apskaičiuokite elektrovarą, indukuotą laide.

■ Žr. 1 ir 2 klausimus.

Indukuotoji srovė

Nusistovėjus elektrovarai, krūvis nustoja srūti, nes elektrinė jėga susilygina su magnetine jėga. Kas atsitinka, kai laidas yra uždaros grandinės dalis?

Įsivaizduokime, kad laidas XY, pavaizduotas 12.4 pav., juda išilgai dviejų bėgių, kurie yra dalis nuoseklios grandinės, kurios atstojamoji varža R omų ir kurią veikia vienalytis magnetinis laukas B. Indukuotoji elektrovara neš krūvį grandine. Paveiksle parodyta sutartinė srovės kryptis.



12.4 pav. **Kai 12.3 pav. laidas sudaro uždarą grandinę, indukuotoji elektrovara varo srovę grandine**

Sutartinės srovės kryptis yra priešinga elektronų judėjimo krypčiai.

Dabar, kai teka srovė (srūva krūvis), jėga (BIl) veikia laidą, kadangi jis yra magnetiniame lauke. Ši jėga veikia priešinga laido judėjimui kryptimi. Kad laidas tebejudėtų pastoviu greičiu v, tokio pat dydžio jėga turi veikti laido judėjimo kryptimi. Per t sekundžių laidas pajuda iki $X'Y'$ atstumą, lygų vt metrų.

Darbas, atliktas judinant laidą:

$$\text{atliktas darbas} = \text{jėga} \times \text{judėjimo atstumas} = BIl \times vt$$

Kadangi energija turi būti tvari, atliktasis darbas lygus perduotai grandinėje elektros energijai:

$$\text{suteikta elektros energija} = \text{jėga} \times \text{laikas} = IV \times t,$$

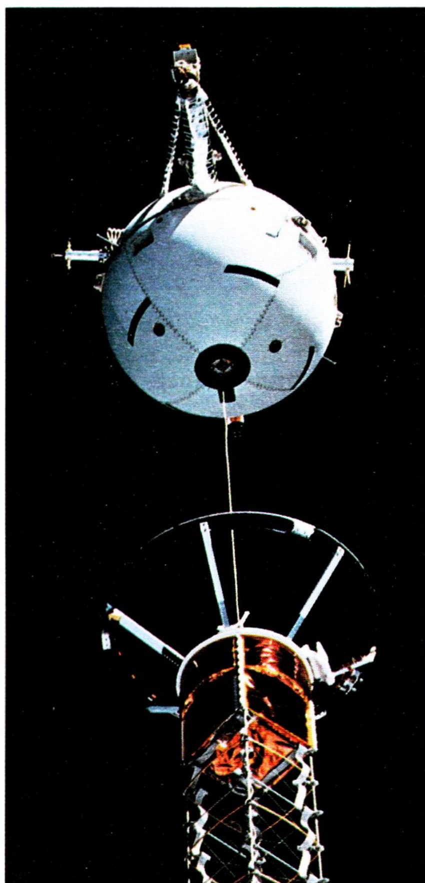
kur V yra potencialų skirtumas apkrovos R gnybtuose. Todėl galime užrašyti:

$$IVt = BIlvt$$

arba:

$$\boldsymbol{V = Blv}$$

Tai yra tas pats, kaip ir formulėje, gautoje 261 puslapyje. Vadinasi, V, indukuotoji elektrovara, yra vienoda, nesvarbu ar imama srovė, ar ne.



1996 m. NASA paleido susietų palydovų sistemą, norėdama sužinoti, kiek elektros galėtų būti generuojama, judant laidui Žemės magnetiniame lauke. Tarp palydovų buvo 20 km varinio laido saitas, kuris turėjo kirsti Žemės lauką.

Palydovui esant orbitoje, buvo išvyniota 19,7 km laido. Tuomet saitas nutrūko. Tačiau 1 A srovė buvo generuota.

Bendresnis dėsnis

Remdamiesi 12.4 pav., galime pažvelgti į šį rezultatą kiek kitaip. Kai laidas XY juda, jis kerta plotą ($vt \times l$), taigi vl yra plotas, kertamas per sekundę:

$$\frac{vt \times l}{t} = vl = \frac{dA}{dt},$$

kur dA/dt yra ploto kitimo greitis.

Dabar galime užrašyti šitokią indukuotosios elektrovaros lygtį:

$$V = B\frac{dA}{dt}$$

Kitaip tariant, indukuotoji įtampa lygi lauko stipriui, padaugintam iš greičio, kuriuo kinta laidininko kertamas plotas.

Faradėjus gavo tą patį rezultatą, tačiau, kaip sužinosite kitame skyriuje, jis naudojosi **srauto** idėja.

PAVYZDYS

K 10 cm laidas juda statmenai 5 mT stiprio nuolatiniam magnetiniam laukui 0,5 m · s^{-1} greičiu. Apskaičiuokite: **a)** laido kertamo ploto kitimo greitį ir **b)** indukuotąją elektrovarą.

A **a)** Laido greitis × ilgis = $\frac{dA}{dt} = vl$

= 0,5 m · s^{-1} × 0,1 m

Taigi ploto kitimo greitis = 0,05 m^2 · s^{-1}

b) $V = B\frac{dA}{dt}$

= 5 × 10^{-3} × 0,05 = 0,25 × 10^{-3} V

Taigi indukuotoji elektrovara = 0,25 mV

■ Žr. 3 ir 4 klausimus.

2 MAGNETINIS LAUKAS IR SRAUTAS

Vienas iš svarbių Faradėjaus fizikos idėjų buvo **lauko linijų** idėja. Jis pirmas pavartojo tokias linijas, kurias braižome aplink magnetus ir rites, apibūdindami laukų stiprio pokyčius ir formą. Jis įsivaizdavo lauko linijas, kertančias paviršių, kaip parodyta 12.5 pav., ir vadino tai „srautu“.

Srautas ϕ apibrėžiamas taip:

Srautas = lauko stipris × jo kertamas plotas

$$\boldsymbol{\phi = BA}$$

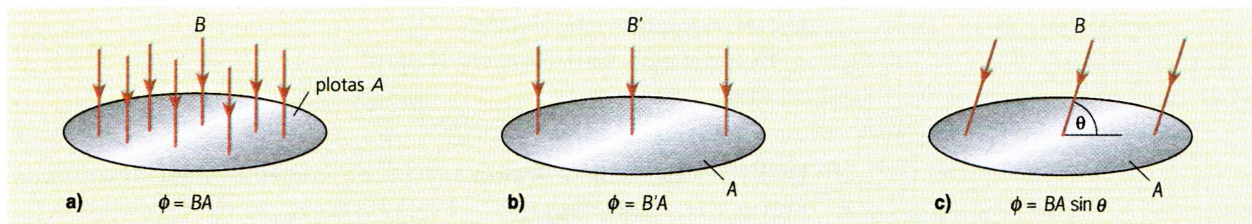
Jei laukas nėra statmenas plotui, tai lygtis tampa tokia:

$$\boldsymbol{\phi = BA \sin \theta}$$

Srautas matuojamas T · m^2; toks dydis vadinamas vėberiu (Wb).

Magnetinis laukas irgi gali būti apibrėžiamas išreiškiant srautu, ir kartais jis vadinamas **srauto tankiu:**

Srauto tankis $B = \phi/A$.



12.5 pav. a) **ir** b) **magnetinis laukas yra statmenas kertamam plotui, ir laukas B' yra silpnesnis už B.** c) **laukas nėra statmenas plotui, ir turi būti išskaidytas į dedamąsias – tik į statmeną plotui dedamąją atsižvelgiama skaičiuojant srautą.**

3 FARADĖJAUS ELEKTROMAGNETINĖS INDUKCIJOS DĖSNIAI

Atlikęs kruopščius eksperimentus, Faradėjus išdėstė savo **elektromagnetinės indukcijos dėsnį.** Jis teigė, kad laido, judančio magnetiniame lauke, indukuotosios elektrovaros didumas yra proporcingas

- magnetinio lauko stipriui,
- greičiui, kuriuo laidas kerta lauką,
- laido vijų skaičiui (pavyzdžiui, jei tai ritės dalis).

Srauto kirtimas ir susiejimas per srautą

Laido judėjimas magnetiniame lauke dažnai nusakomas šitaip: **srauto kirtimas.**

Tačiau Faradėjaus „transformatoriaus" bandymuose nėra jokių judančių laidų. Vėl pažvelkite į 12.2 pav.: srovė indukuojama antrinėje ritėje, kai srovė pirminėje ritėje kinta. Srovė pirminėje ritėje sukuria magnetinį srautą, kuris paveikia antrąją ritę. Kai šis srautas kinta, antrinėje ritėje indukuojama srovė. Tai vadinama **susiejimu per srautą**. Indukuotoji srovė yra proporcinga:

- lauko stipriui,
- pirminės ritės sukurto srauto kitimo greičiui,
- vijų skaičiui N antrinėje ritėje.

Vadinasi, tam, kad antrinėje ritėje būtų indukuojama nenutrūkstama srovė, pirminėje srovė turi nepaliaujamai kisti. Pavyzdžiui, jei tai bus kintamoji srovė, tai indukuotoji srovė irgi kis.

Indukuotoji srovė priklausys dar ir nuo kintamosios srovės dažnio. Kai dažnis didesnis, srautas pakinta per trumpesnį laiką; t. y. srauto kitimo greitis padidėja, ir indukuotoji srovė esti didesnė.

Priešingai, jei kintamosios srovės dažnis pirminėje ritėje mažesnis, srauto kitimas trunka ilgiau, taigi srauto kitimo greitis ir indukuotoji srovė esti mažesni.

?

B Kad antrinėje ritėje būtų indukuota srovė, ar turi pakisti srovė pirminėje ritėje? Pagrįskite savo atsakymą.

Indukuotosios srovės didumas antrinėje ritėje yra proporcingas kintamosios srovės pirminėje ritėje dažniui.

Faradėjaus dėsniai gali būti apibendrinti vienu teiginiu:

Indukuotoji elektrovara proporcinga srauto kitimo greičiui.

Arba, jei ϵ yra indukuotoji elektrovara,

$$\epsilon = N\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t},$$

kur N yra laido vijų skaičius.

Ta lygtis gali būti užrašyta ir taip:

$$\epsilon = \frac{\mathrm{d}(N\phi)}{\mathrm{d}t}$$

Dydis $N\phi$ vadinamas **srauto sąsaja** ir vartojamas nagrinėjant konkrečią ritę su N vijų.

Žr. 5 klausimą. ■

4 LENCO DĖSNIS

Kai šiaurinis magneto polius kišamas į ritę, indukuojamosios srovės laukas sukuria kitą „šiaurės polių“ pačioje ritėje. Srovė tarsi „priešinasi“ artinamam šiauriniam poliui. Kai magnetas traukiamas iš ritės, indukuojamosios srovės kryptis pasikeičia priešinga, ir tada ritės galas tampa pietiniu poliumi. Ritės laukas vėl priešinasi dabar jau tolinamam šiauriniam poliui (12.6 pav.).

Lenco dėsnis teigia:

Indukuojamos srovės kryptis tokia, kad jos magnetinis laukas priešinasi ją sukėlusiam magnetinio srauto pokyčiui.

Lenco dėsnis yra energijos tvermės dėsnio „elektromagnetinė“ versija. Jei neveiktų Lenco dėsnis, energija būtų netvari.

Pasipriešinimą kitimui atspindi įvestas minuso ženklas. Indukuotosios elektrovaros lygtis turi būti rašoma taip:

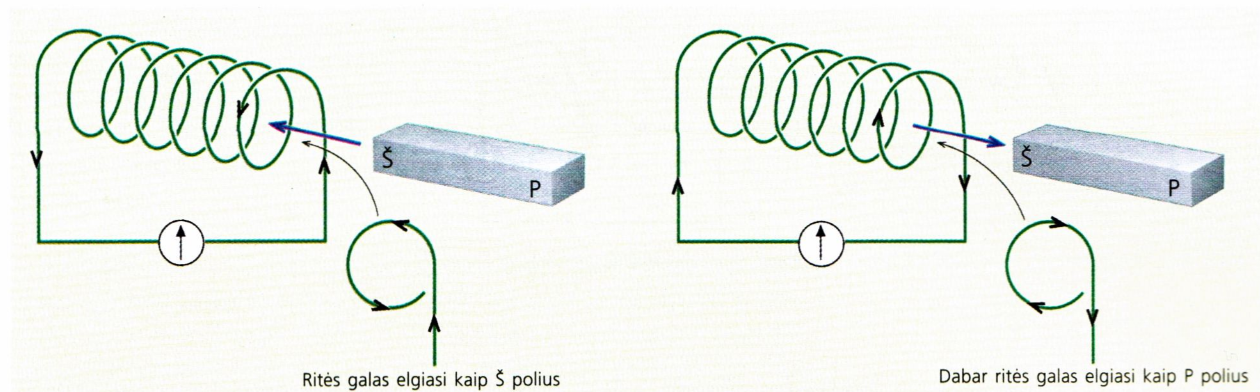
$$\epsilon = -N\frac{d\phi}{dt}$$

?

C Paaiškinkite, kodėl energija būtų netvari, jei negaliotų Lenco dėsnis.

?

D Kai magnetas kišamas į ritę, kaip 12.1 pav., galvanometro rodyklė pasisuka į vieną pusę, po to grįžta prie nulio. Kai magnetas ištraukiamas, rodyklė pasisuka į kitą pusę ir vėl grįžta prie nulio. Pasinaudokite Lenco dėsniu tam reiškiniui paaiškinti.



12.6 pav. **Lenco dėsnio iliustracija**

Matematinis Faradėjaus dėsnių nagrinėjimas

Indukuotoji elektrovara

$$\begin{aligned}\epsilon &= -N\frac{d\phi}{dt}\\ &= -N\frac{d(BA)}{dt}\\ &= -N\left(B\frac{dA}{dt} + A\frac{dB}{dt}\right)\\ &= -\left(NB\frac{dA}{dt} + NA\frac{dB}{dt}\right)\end{aligned}$$

↑ **srauto kirtimo narys** ↑ **srauto susiejimo narys**

Srauto kirtimo narys aprašo indukuotąją elektrovarą, sukurtą laido, *judančio pastoviame* magnetiniame lauke, tarkime generatoriuje. Greitis, kuriuo judantis lauke laidas kerta plotą, lemia tą elektrovarą.

Srauto susiejimo narys aprašo indukuotąją elektrovarą, sukurtą *besikeičiančio srauto*, sąveikaujančio su *nejudamu* laidu, kaip transformatoriuje. Srautas, sukurtas vienos ritės, „siejasi“ su antra rite. Greitis, kuriuo kinta srautas (tą greitį dažniausiai lemia srovė pirminėje ritėje), sąlygoja indukuotąją elektrovarą.

Nuolatinės srovės mašina

Matėme, kad plataus masto elektros energijos gamybai pradžią padarė Faradėjaus bandymas. Jėgainės visame pasaulyje, tiek kūrenamos iškastiniu kuru, tiek panaudojančios vėjo jėgą, gamina indukuotąją srovę. Jungtinėje Karalystėje elektra generuojama **kintamosios srovės** pavidalu. Kintamosios srovės lygtis yra tokia:

$$I = I_0 \sin 2\pi f t,$$

kur I_0 yra didžiausia srovė. Paprastas dviračio generatorius ir generatoriai, naudojami jėgainėse, yra iš esmės tokie patys.

Dabar tarkime, kad rėmelio kampinis greitis yra ω, ir pajudėti kampu α trunka t sekundžių. Tada

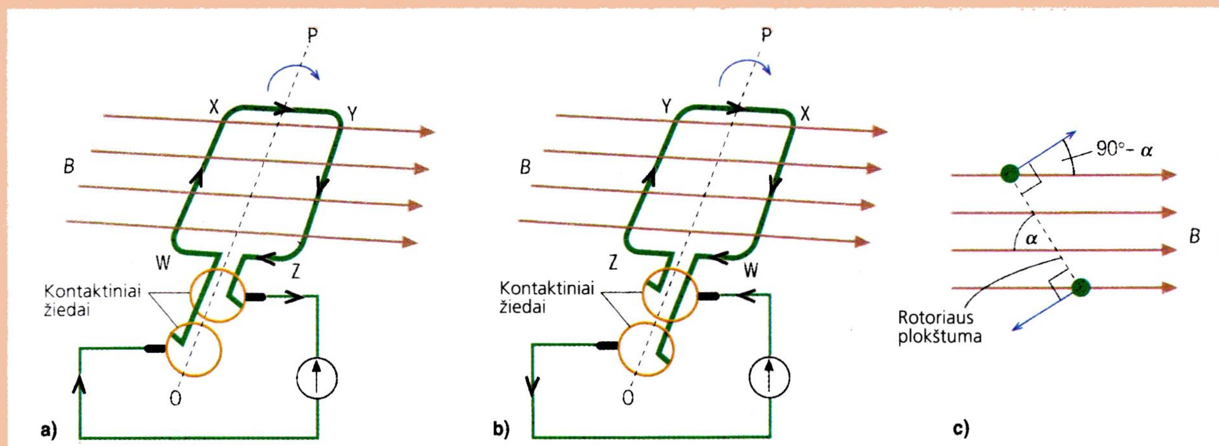
$$\alpha = \omega t,$$

o greitis v susijęs su ω ir ritės pločiu x:

$$v = \omega \frac{x}{2}$$

Taigi pilnoji elektrovara, sukurta abiejų kraštinių, bus šitokia:

$$\epsilon = 2By\omega x/2 \cos \omega t$$
$$= Bxy\omega \cos \omega t$$



12.7 pav. **Kaip veikia nuolatinės srovės mašina ir α apibrėžimas**

12.7a) pav. atvaizduotas stačiakampis rėmelis, besisukantis apie ašį OP vienalyčiame B teslų stiprio magnetiniame lauke. Kadangi rėmelio kraštinės WX ir YZ juda statmenai laukui, tik priešingomis kryptimis, tai elektrovara, indukuota bet kurioje kraštinėje, sukels srovę ta pačia kryptimi aplink rėmelį.

Po pusės ciklo WX ir YZ bus apsikeitusios vietomis (12.7b) pav.) Srovė išteka iš rėmelio pro kontaktinius žiedus. Grandinės galas visuomet liečiasi su vienu iš žiedų, leisdamas tekėti vienos krypties srovei. Galvanometre tekančios srovės kryptis dabar pasikeis. Kitą ciklo pusę rėmelis grįžta atgal, ir srovė vėl teka ta kryptimi, kaip ir pradžioje.

Sukantis rėmeliui srovė tai stiprėja, tai silpnėja. Sakykime, 12.7c) pav. rėmelio plokštuma sudaro su lauku kampą α, o kraštinės WX ir YZ yra ilgio y ir juda greičiu v. Indukuotoji elektrovara kiekvienoje kraštinėje bus tokia:

$$\epsilon = Byv \sin (90° - \alpha) = Byv \cos \alpha$$

Bet $xy = A$, t. y, rėmelio plotui, $\omega = 2\pi f$, kur f yra sukimosi dažnis. Todėl N vijų ritei

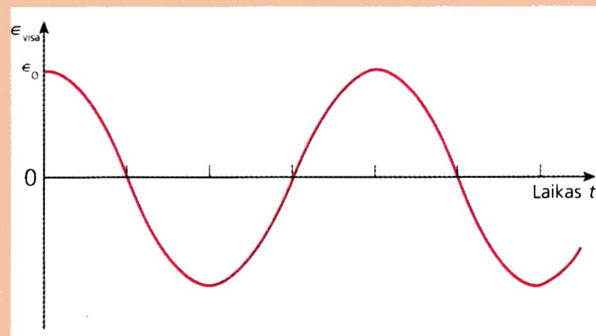
$$\epsilon_{visa} = 2\pi fNBA \cos 2\pi ft$$

Tai yra kintamosios įtampos lygtis, kurios didžiausia vertė

$$\epsilon_0 = 2\pi fNBA$$

taigi $\epsilon_{visa} = \epsilon_0 \cos 2\pi ft$

Nuolatinės srovės mašinos elektrovara parodyta 12.8 pav. brėžinyje.

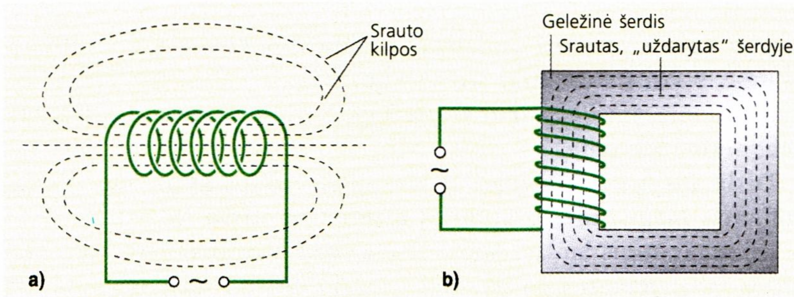


12.8 pav. **Nuolatinės srovės mašinos elektrovara**

5 MAGNETINĖS GRANDINĖS

Pavyzdžiuose, parodytuose 12.9 pav., srautą sukuria srovė, tekanti rite, arba **solenoidu.** Tas srautas, kurį vaizduoja lauko linijos, yra uždaros kilpos. Taip yra visais atvejais. Kartais (pavyzdžiui, kaip 12.9a) pav.) kilpos susidaro erdvėje aplink ritę ir pro ją, kitais atvejais (12.9b) pav.) jos visos yra vientisoje šerdyje. Galime laikyti šias uždaras kilpas „magnetinėmis grandinėmis".

„Minkšta geležis" – taip apibūdinamos jos magnetinės savybės – ne kietumas! Žr. 270 p.).



12.9 pav. **Srautas** a) **aplink solenoidą ir** b) **transformatoriaus šerdyje**

9 skyriuje, 205 p., aptarėme, kad fiziniai laido parametrai (skerspjūvio plotas ir ilgis) nulemia paprastos elektrinės grandinės srovę. Panašiai ir čia sužinosime, kad magnetinės grandinės parametrai turi įtakos sukuriamo srauto didumui.

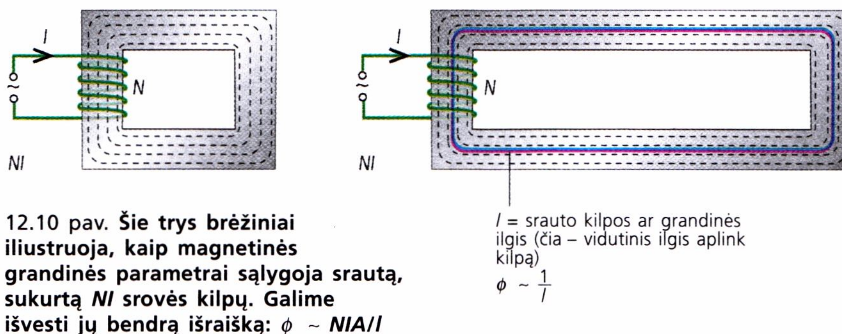
Srautas priklauso ir nuo srovės bei vijų skaičiaus ritėje. Be srovės ir be ritės vijų nebūtų srauto. Sakome, kad srautas yra generuojamas **srovės vijų.** Jei N yra vijų skaičius, I yra srovė, o ϕ yra srautas, tai

$$NI \sim f$$

Kad suprastume, kaip magnetinės grandinės matmenys sąlygoja srautą, įsivaizduokime transformatorių. Srautas yra generuojamas pirminės ritės. Geležinė šerdis turi įdomią ir naudingą savybę išlaikyti beveik visą srautą savo viduje. Fiziniai šerdies matmenys, jos skerspjūvio plotas ir ilgis nulemia srautą, kaip pavaizduota 12.10 pav.

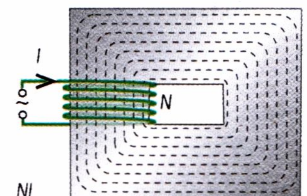
E Aiškiai apibrėžkite, kaip šerdies matmenys sąlygoja srautą.

■ Žr. 6 klausimą.



l = srauto kilpos ar grandinės ilgis (čia – vidutinis ilgis aplink kilpą)

$\phi \sim \frac{1}{l}$



$\phi \sim A$

A = geležinės šerdies plotas

12.10 pav. **Šie trys brėžiniai iliustruoja, kaip magnetinės grandinės parametrai sąlygoja srautą, sukurtą *NI* srovės kilpų. Galime išvesti jų bendrą išraišką:** $\phi \sim NIA/l$

Magnetinės grandinės, lyginant su elektrinėmis grandinėmis

Šioje vietoje verta palyginti magnetines grandines su paprasčiausiomis elektrinėmis grandinėmis.

Įtampa V sukelia srovę I grandinėje, turinčioje elektrinę varžą. Varža priklauso nuo laido matmenų ir medžiagos (žr. 205 p.).

Kai A yra laido skerspjūvio plotas, l – laido ilgis, o ρ yra savitoji laido medžiagos varža, tai

$$V = IR$$
$$= I\frac{\rho l}{A}$$

Žvelgdami į 12.10 pav., galime parašyti panašią lygtį magnetinei grandinei:

$$NI = \phi \times \text{konstanta} \times \frac{l}{A}$$

Lygiai kaip srovė yra „sukurta" įtampos elektrinėje grandinėje, srautas ϕ yra sukuriamas srovės vijų, NI.

Konstanta yra l/μ, kur μ yra terpės, kurioje sukuriamas srautas, **magnetinė skvarba.**

Dydis l/μ A yra magnetinės grandinės varžos atitikmuo. Jis vadinamas magnetinės grandinės **magnetine varža** (R_{magn}).

Jei magnetinis laukas sukuriamass ore (kuris magnetiniams laukams labai panašus į vakuumą – tuščią erdvę), tai konstanta yra l/μ_0, kur μ_0 yra vakuumo (tuščios erdvės) magnetinė skvarba, matuojama N · A^{-2}. Kurioje nors kitoje aplinkoje ta konstanta yra $1/\mu_0\mu_r$, kur μ_r yra tos aplinkos **santykinė magnetinė skvarba.** Tai yra,

$$NI = \phi\frac{l}{\mu_0\mu_r A}$$

> **?**
> **F** Yra svarbus skirtumas tarp elektrinių ir magnetinių grandinių. Žinome, kad elektros srovė yra krūvio srautas, – kulonai per sekundę. Kas „srūva" magnetinėje grandinėje?

Savitoji elektrinė varža ρ siejasi su savituoju elektriniu laidumu σ pagal lygtį

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Iš palyginimo matyti, kad „savitasis elektrinis laidumas" yra analogiškas magnetinei skvarbai. *Magnetinę skvarbą* galime laikyti tam tikru „savituoju magnetiniu laidumu", – jis mums nusako, kiek aplinka geba leisti susidaryti joje magnetiniam laukui. Santykinė magnetinė skvarba nusako, kiek kartų geresnė yra ta aplinka, palyginus su vakuumu.

Žr. 7 klausimą. ■

Elektrinės ir magnetinės grandinės trumpas apibūdinimas

Elektrinių grandinių ir magnetinių grandinių palyginimas:

$$V = IR \qquad NI = \phi R_{magn}$$
$$V = I\frac{l}{\sigma A} \qquad NI = \phi\frac{l}{\mu_0\mu_r A}$$

12.1 lentelėje palyginti elektriniai ir magnetiniai dydžiai.

12.1 lentelė

Elektrinis dydis	Magnetinis dydis
Įtampa V	Srovės vijos NI
Varža R	Magnetinė varža R_{magn}
Savitasis laidumas σ	Magnetinė skvarba $\mu_0\mu_r$
Srovė I	Srautas ϕ

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite magnetinį lauką ilgame solenoide be šerdies su dešimčia vijų viename centimetre, kai juo teka 1 A srovė. (Tuščios erdvės magnetinė skvarba $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N · A^{-2}.)

A Pasinaudokite srovės vijų lygtimi

$$NI = \phi\frac{l}{\mu_0 A} = \frac{\phi}{A}\frac{l}{\mu_0}$$
$$= B\frac{l}{\mu_0} \quad (\text{kadangi } B = \frac{\phi}{A}).$$

Pertvarkius

$$B = \frac{N}{l}I\mu_0 \quad (10 \text{ vijų cm}^{-1} = 1000 \text{ vijų m}^{-1})$$
$$= 1000 \times 1 \times 4\pi \times 10^{-7}$$
$$= 12{,}6 \times 10^{-4} \text{ T}$$

Magnetinis laukas solenoide = 1,26 mT

6 MAGNETINIŲ GRANDINIŲ TAIKYMAS

Ilgo solenoido sukurtas laukas

Įsivaizduokite l metrų ilgio solenoidą iš N vijų, suriestą į žiedą, kaip 12.11 pav. Tekant srovei, srautas sudaro ritės viduje uždarą kontūrą, irgi l ilgio. Solenoido, taip pat ir srauto kanalo, skerspjūvio plotas yra $A \cdot m^{-1}$. Tarkime, kad solenoido aplinka yra oras. Pradedame nuo srauto lygties:

$$NI = \phi \frac{l}{\mu_0 A}$$

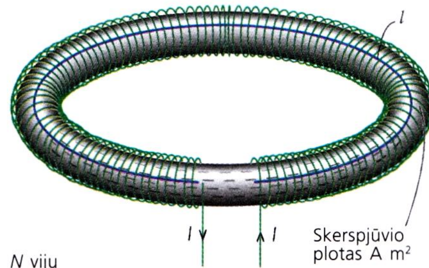
Tada, kadangi $\phi = BA$ (srauto tankis × plotas), galime užrašyti:

$$NI = \frac{BAl}{\mu_0 A} = \frac{Bl}{\mu_0}$$

Galime pertvarkyti lygtį ir gauti lauko stiprį B solenoide:

$$\boldsymbol{B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I},$$

kur $n = N/l$ – vijų skaičius 1 metre.



12.11 pav. **Ilgame solenoide srautas sudaro uždarą kontūrą**

Ilgo tiesaus laido sukurtas laukas

Kaip ir 12.12 pav., įsivaizduokite A skerspjūvio ploto srauto žiedą aplink laidą atstumu r nuo jo. Laidas gali būti laikomas labai didelės vienos vijos ritės dalimi, t. y. $N = 1$. Todėl srovė

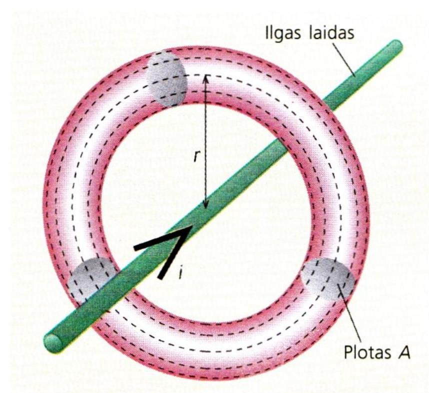
$$I = \phi \frac{l}{\mu_0 A}$$

Srauto žiedo ilgis l yra $2\pi r$, ir kadangi $\phi = BA$,

$$I = \frac{BA 2\pi r}{\mu_0 A}$$

Pertvarkę gauname:

$$\boldsymbol{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}}$$



12.12 pav. **Ilgo tiesaus laido sukurtas laukas**

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite magnetinio lauko stiprį aplink tiesų laidą, kuriuo teka 10 A srovė: **a)** 10 cm, **b)** 20 cm, **c)** 100 cm atstumu nuo jo. (Tuščios erdvės magnetinė skvarba $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N · A^{-2}.)

A

a) Pasinaudojame magnetinio lauko stiprio lygtimi:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10}{2\pi \times 0{,}1}$$

Magnetinio lauko stipris 10 cm atstumu = 2×10^{-5} T

b) Kadangi r atvirkščiai proporcingas B, ir kadangi r čia padvigubėja, tai B sumažės perpus iki 1×10^{-5} T.

c) Dabar įsitikinkite, kad, esant 100 cm r vertei, lauko stipris yra 2×10^{-6} T.

Geležies įtaka

Geležis turi labai didelę santykinę magnetinę skvarbą, ir būtent todėl ji labai tinka, pavyzdžiui, elektromagnetams gaminti. Kai ritė suvyniojama ant minkštos geležies šerdies, sukuriamas magnetinis laukas yra apie tūkstantį kartų stipresnis, negu kad būtų be geležies. Geležis dar pasižymi savybe netekti didžiosios magnetizmo dalies, vos nustojus tekėti srovei. Būtent todėl ji ir vadinama „minkšta“. Magnetiškai „kieta“ medžiaga, tokia kaip plienas, išlaikytų didžiąją dalį magnetizmo, jei būtų panaudota toje pačioje ritėje. Minkštos geležies gebėjimą turėti stiprų indukuotą magnetinį lauką nulemia jos **santykinė magnetinė skvarba** μ_r. Geležies μ_r vertė yra apie 1000.

Magnetinis laukas solenoide su geležine šerdimi

$$B = \mu_r \mu_0 N l,$$

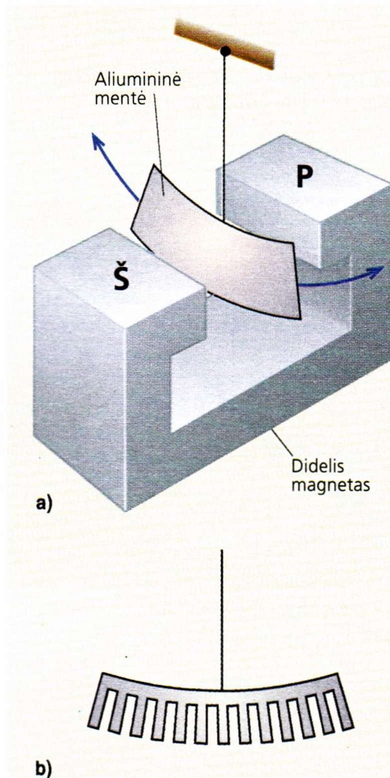
kur N = vijų skaičius, o l = srauto kilpos ilgis.

Galime sakyti, kad geležis yra „geras magnetizmo laidininkas“. Daug kitų magnetinių medžiagų turi dideles santykines magnetines skvarbas, bet jų tankis mažesnis nei geležies. Jos taikomos, kur lengvas svoris yra privalumas, kaip antai miniatiūrinėse ausinėse ir mažuose varikliukuose, naudojamuose nešiojamų garsajuosčių grotuvuose.

7 SŪKURINĖS SROVĖS

Sūkurinės srovės indukuojamos masyviame laidininke, kai jis juda magnetiniame lauke arba kai yra besikeičiančiame magnetiniame lauke. Tos srovės vadinamos „sūkurinėmis“, nes krūvis juda verpetuojančia trajektorija, labai panašia į sūkurines sroves upės vandenyje.

12.13 pav. atvaizduota, kaip susidaro sūkurinės srovės. Švytuoklė turi aliumininę mentę. Kai ji švytuoja tarp magneto polių, jos judėjimas yra labai slopinamas, – ji sulėtėja ir sustoja po kelių mostų.



12.13 pav. a) **Aliumininės mentės švytavimai magnetiniame lauke iliustruoja sūkurinių srovių poveikį.** b) **Mentė su plyšiais švytuoja ilgiau už ištisinę**

Šis efektas, kartais vadinamas **elektromagnetiniu stabdymu,** yra dėl srovių, indukuotų aliuminyje, jam kertant magnetinį lauką. Srovės teka uždarais ratais aliuminyje ir, kaip ir visos indukuotos srovės, paklūsta Lenco dėsniui. Patiksliname – jos teka tokia kryptimi, kad sukelia pasipriešinimą jas sukėlusiam pokyčiui.

Mentei pasiekus lauką (ir padidėjus B), joje indukuojama sūkurinė srovė. Judantys elektronai sūkurinėje srovėje magneto lauke patiria jėgą, besipriešinančią mentės judėjimui, taigi, stabdančią mentę. Jėga, veikianti judančius elektronus, yra ta pati kaip ir „judesio efekte“ (251 p.).

Kai mentė išeina iš lauko (tada B sumažėja), indukuotos srovės kryptis pasikeičia priešinga, kaip ir „judesio efekto“ jėga. Dėl to ji dar labiau sulėtėja. Po kelių mostų mentė sustoja.

Jei ištisinė mentė pakeičiama mente su plyšiais, jai sukeliamas kur kas mažesnis poveikis ir ji švytuoja ilgiau.

Plyšiai apriboja galimus sūkurinių srovių kelius ir veiksmingai sumažina indukuotas sroves.

Magnetinis stabdymas gali praversti, kai reikalingas slopinimas. Tačiau sūkurinės srovės dažniau praktikoje trukdo, kadangi jos dėl medžiagos elektrinės varžos sklaido energiją. Energijos sklaida gali būti naudinga, pavyzdžiui, taikant indukcinio kaitinimo režimą. Tačiau varikliuose ir transformatoriuose (žr. 276 p.) kaitimo neturi būti, o kartais jis net grėsmingas.

?

G Magnetas, paleistas laisvai kristi žemyn plastmasiniu vamzdžiu, greitėjančiai juda link žemės. Kai tas pats magnetas krinta tokių pat matmenų variniame vamzdyje, jis užtrunka ilgiau iki pasiekia žemę. Magnetas neliečia nė vieno vamzdžio sienelių. Kodėl nukristi variniu vamzdžiu trunka ilgiau?

Transformatorius yra indukcijos prietaisas. Pirminė ir antrinė ritės suvyniojamos ant minkštos geležies šerdies, ir kintamoji elektrovara pirminėje ritėje indukuoja elektrovarą antrinėje ritėje. Tokiais atvejais geležinės šerdys turi būti tokios, kad jose susidarytų kuo mažesnės sūkurinės srovės. Transformatoriaus minkštos geležies šerdis laminuojama – t. y. supjaustoma labai plonais sluoksniais lygiagrečiai magnetiniam srautui. Šie sluoksniai nulakuojami, padengiami izoliuojančia medžiaga ir po to vėl pakuojami, kur elektrai laidūs sluoksniai yra labai arti vienas kito, tačiau tarp jų sąlyčio nėra. Taip šerdis išlaiko daugelį metalo magnetinių savybių, tačiau sumažinamos sūkurinės srovės.

Šiuolaikinės feritinės medžiagos yra pagamintos iš mažų geležies oksido dalelių pastos, sukepintos į kietą gabalą. Dalelės yra pakankamai arti, kad būtų geros magnetinės savybės (didelis μ_r), tačiau sūkurinės srovės yra sumažintos iki minimumo.

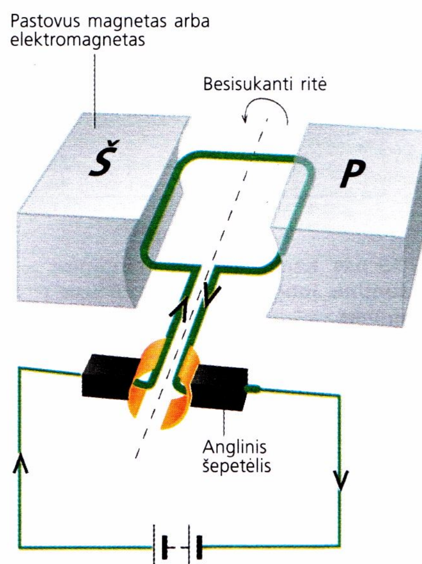
H Pateikite keletą magnetinio stabdymo panaudojimo praktinių pavyzdžių.

8 PAPRASTO NUOLATINĖS SROVĖS VARIKLIO VEIKIMAS

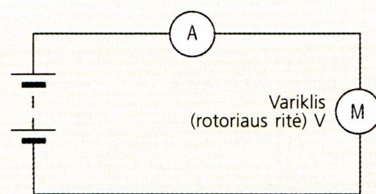
Srovė, imama paprasto variklio (kaip kad aprašytasis 248 p.), įdomiai keičiasi. Kai neapkrautas variklis įjungiamas, pradinė srovė, vartojama rotoriaus ritės iš jos energijos šaltinio, yra labai didelė, tačiau veikiai ji sumažėja iki daug mažesnės vertės. Jei variklis tada smarkiai apkraunamas, jo vartojama srovė palaipsniui didėja. Kitas svarbus faktas yra tai, kad varikliui atliekant darbą, jo greitis mažėja.

Variklis sukasi dėl jėgos, veikiančios laidą, kuriuo teka srovė, BIl. Srovė I yra varoma iš šaltinio prijungtos elektrovaros ϵ_a.

Ritei sukantis, joje indukuojama elektrovara ϵ_i. Ši elektrovara stengiasi varyti srovę priešinga kryptimi, negu srovė iš energijos šaltinio (Lenco dėsnis). Indukuotos elektrovaros didumas priklauso nuo ritės sukimosi greičio. Kuo greičiau sukasi ritė, tuo didesnė indukuotoji elektrovara. Atstojamąją srovę (ji išmatuojama ampermetru) sudaro dviejų elektrovarų suma. 12.14b) pav. atvaizduota paprasto variklio grandinės schema.



12.14a) pav. **Paprastas nuolatinės srovės variklis (neprijungta jokia apkrova)**



12.14b) pav. **Variklio grandinės schema**

Kai variklis pradeda suktis, indukuotos srovės nėra. Todėl pradinė ampermetru rodoma srovė yra didelė. Variklio greičiui didėjant, taip pat didėja ir indukuotoji elektrovara, ir visa ampermetro rodoma srovė sumažėja. Jei variklis atlieka darbą ir sulėtėja, indukuotoji elektrovara sumažėja ir matuojamoji srovė padidėja, suteikdama varikliui daugiau energijos.

Jei imame varžą rotoriaus grandinėje (tai apima ir energijos šaltinio vidinę varžą), galime teigti:

$$\text{visa varža} = \frac{\text{šaltinio elektrovara} - \text{indukuotoji elektrovara}}{\text{srovė}}$$

arba

$$R = \frac{\epsilon_a - \epsilon_i}{I}$$

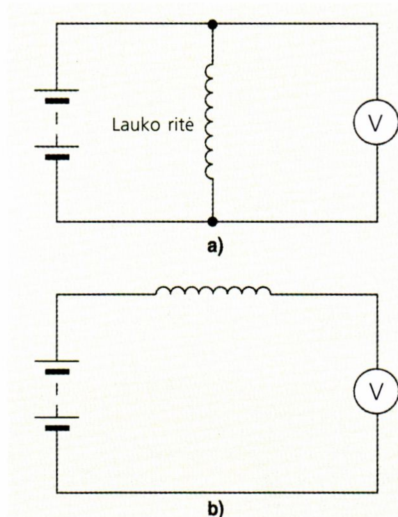
Galime tai pertvarkyti lygtį ir gauti srovę:

$$I = \frac{\epsilon_a - \epsilon_i}{R}$$

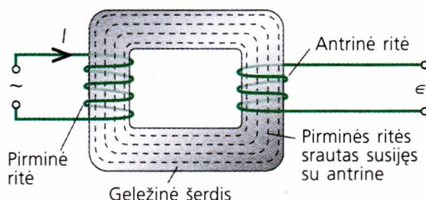
I yra srovė, matuojama ampermetru.

Padarę pagrįstą prielaidą, kad varža išlieka pastovi (jei ritė nekaista), matome, kad srovė priklauso nuo skirtumo tarp pridėtosios ir indukuotosios elektrovaros. Indukuotoji elektrovara ϵ_i dažnai vadinama **atgaline elektrovara.**

I Koks bus poveikis a) varžai ir b) srovei, jei ritė gerokai įkaista?

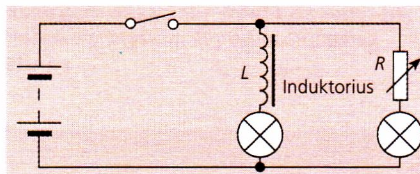


12.15 pav. **Realių variklių grandinės:** a) **šuntinis jungimas;** b) **nuoseklusis jungimas**



12.16 pav. **Abipusis induktyvumas**

J Dvi ritės suvytos ant tos pačios šerdies. Srovė pirmoje ritėje padidėja nuo nulio iki 20 mA per 0,5 ms. Elektrovara, indukuojama išilgai antrinės, yra 2 V. Apskaičiuokite abipusį induktyvumą.



12.17 pav. **Paprasta grandinė savajam induktyvumui demonstruoti. Rezistoriaus vertė *R* paderinama taip, kad abi lemputės spindi vienodai, kai srovė nusistovi. Kai grandinė įjungiama, lemputė nuosekliai su rezistoriumi įsižiebia anksčiau nei lemputė, įjungta nuosekliai su induktoriumi**

Žemiau pateikiama lygtis irgi padeda mums suprasti variklio energijos balansą:

$$IR = \epsilon_a - \epsilon_i$$

arba:

$$\epsilon_a = \epsilon_i + IR$$

Padauginę abi puses iš srovės I, gauname:

$$\epsilon_a I = \epsilon_a I + I^2R$$

Išreiškus žodžiais:

Energija iš šaltinio = naudingoji energija + energija, prarandama kaitinant rotoriaus ritę.

Tai gana supaprastintas tikro variklio vaizdas. (Energija, prarasta kaitinant rotoriaus ritę, vadinama vario nuostoliais.)

Kad būtų sukuriamas kiek galint didesnis magnetinis laukas, ritė daugumoje variklių vyniojama ant minkštos geležies šerdies. Dėl to atsiranda galimybė patirti tam tikrus sūkurinių srovių nuostolius, net jei medžiaga ir parinkta taip, kad jie būtų mažiausi. Kitas galimas energijos nuostolių šaltinis yra **srauto nuostoliai:** neišvengiamas tarpas tarp rotoriaus ir magneto (ar elektromagneto) polių sumažina juos siejantį srautą, kadangi dalis srauto pasklinda į išorę, arba „nuteka“ ties tarpu.

Vietoj nuolatinių magnetų daugumoje realių variklių naudojami elektromagnetai, paprastai vadinami „lauko ritėmis“; keletas ričių suvyniojama ant aukštos magnetinės skvarbos šerdies, kad būtų sukuriamas norimos formos stiprus laukas. Toks variklis tuomet turi lauko rites ir rotoriaus ritę. Šios gali būti sujungtos lygiagrečiai arba nuosekliai (12.15 pav.).

9 INDUKTYVUMAS

Abipusis induktyvumas

12.16 pav. ϵ_i antrinėje ritėje indukuojama elektrovara, jei tik pirminės ritės sukurtas srautas kinta. Srautas iš pirminės ritės kis tik kartu su srove pirminėje ritėje. Todėl

$$\epsilon_i = -N_S k\frac{dI}{dt} = -M\frac{dI}{dt},$$

kur N_S yra vijų skaičius antrinėje ritėje, o $M = N_S k$. Konstanta k priklauso nuo tokių veiksnių, kaip pirminės ritės vijų skaičius ir rotoriaus ritės šerdies santykinė magnetinė skvarba; visi jie turėtų būti pastovūs. M vadinama **tarpusavio induktyvumu.** Jis matuojamas V · s · A^{-1}, arba henriais.

Savasis induktyvumas

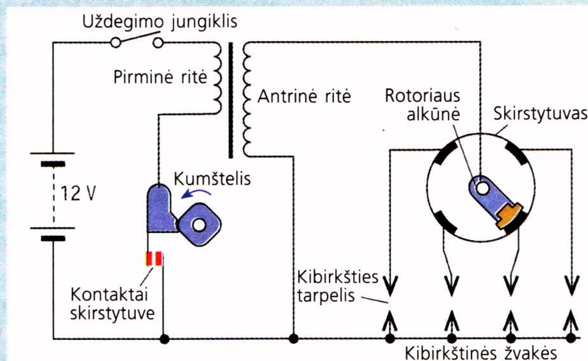
12.17 pav. atvaizduota nesudėtinga grandinė. Dvi lemputės yra identiškos, o ritės varža yra tokia pat kaip ir rezistoriaus. Ritė turėtų būti su minkštos geležies šerdimi, kad efektas būtų pastebimas.

Sujungus jungiklį, abi lemputės užsidega, bet įsižiebia ne kartu. Yra nemažas uždelsimas nuo to momento, kai įsižiebia nuosekliai su rezistoriumi įjungta lemputė, iki įsižiebia kita lemputė. Kai abi įžiebtos, jos spindi vienodu skaisčiu. Srovės stabdymo efektas nusakomas kaip ritės **indukcinis efektas.** Todėl ritės dar vadinamos **induktoriais.**

INDUKCINĖS RITĖS

BENZININIO VARIKLIO VAROMOJI JĖGA sukuriama sprogus benzino ir oro mišiniui. Sprogstamasis mišinys uždegamas kibirkšties iš kibirkštinės žvakės, o pati kibirkštis susidaro, kai maždaug nuo 2 iki 3 kV prijungiama prie kibirkšties tarpelio.

Panaudojus indukciją, ši aukšta įtampa atsiranda iš 12 V automobilio baterijos. Besisukantis kumštelis skirstytuve praveria kontaktus ir šitaip nutraukinėja srovę pirminėje ritėje. Staigus pirminės srovės sumažėjimas reiškia, kad tos srovės kuriamas magnetinis laukas irgi staiga pranyksta. Greitas kitimas tada indukuoja labai aukštą įtampą antrinėje ritėje. Ši įtampa prijungiama prie vienos iš kibirkštinių žvakių per rotoriaus alkūnę. Per vieną kumštelio apsisukimą aukšta įtampa indukuojama keturis kartus ir prijungiama paeiliui prie kiekvienos iš keturių žvakių.



12.18 pav. Automobilio uždegimo sistema

Kai grandinė 12.17 pav. įjungiama pirmą kartą, krūvis pradeda tekėti induktoriumi. Ši srovė kuria magnetinį lauką ritėje, kur jo anksčiau nebuvo, – taigi yra besikeičiantis magnetinis laukas.

Tas kintamasis magnetinis laukas indukuoja įtampą, kuri priešinasi kitimui (Lenco dėsnis). Jis daro tai, sukurdamas elektrovarą priešinga kryptimi, nei prijungtosios įtampos elektrovara. Dėl to srovė ritėje stiprėja lėčiau nei paprastame rezistoriuje. Tačiau ilgainiui srovė ritėje pasiekia maksimumą. Tą maksimalią srovę lemia prijungtoji įtampa ir visa grandinės varža (12.19 pav.).

Galutinė pastovi srovė priklauso nuo šaltinio ir nuo induktoriaus varžos:

$$I = \frac{\text{prijungta elektrovara}}{\text{visa varža}}$$

Nors srovės augimas gali teužtrukti mažą sekundės dalelę, iš pradinio kreivės 12.19 pav. gradiento matyti, kad srovės kitimo greitis ($\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$) iš pradžių yra pastovus.

Šis srovės kitimo greitis priklauso nuo dviejų veiksnių: prijungtosios įtampos ir indukcinio ritės poveikio. Bandymai rodo, kad pradinis srovės didėjimo greitis tiesiog proporcingas prijungtajai įtampai:

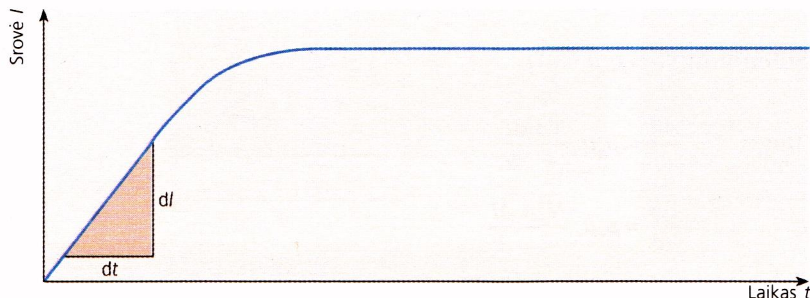
$$V \sim \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

Proporcingumo konstanta yra ritės savybė, vadinama ritės **savuoju induktyvumu,** ir jai suteikiamas simbolis L:

$$V = L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

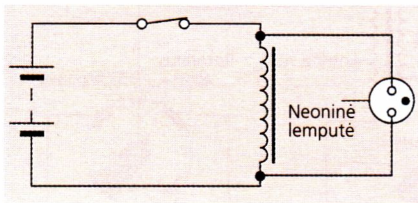
Savojo induktyvumo vienetas yra henris, – tas pats kaip ir tarpusavio induktyvumo vienetas.

■ Žr. 8 klausimą.



12.19 pav. **Srovės, tekančios induktoriaus grandinėje, 12.17 pav. priklausomybės nuo laiko grafikas**

12.20 pav. **Nutraukus jungikliui grandinę, neoninė lemputė įsižiebia; tai rodo esant didelę, apie 80 V ar didesnę, indukuotą elektrovarą**



Išjungus jungiklį, induktoriaus srovė išnyksta daug greičiau. Ši mažėjanti srovė indukuoja didelę elektrovarą priešinga nei prijungtoji elektrovara kryptimi. Galime pademonstruoti šios elektrovaros didumą, prie induktoriaus prijungę neoninę lemputę, kaip pavaizduota 12.20 pav. Kad įsižiebtų neoninė lemputė, jai reikalinga bent 80 V įtampa. Kai tik jungiklis nutraukia šią grandinę, lemputė įsižiebia!

PAVYZDYS

K 50 mH induktorius prijungtas prie 3 V nuolatinės srovės šaltinio. Kiek padidėja srovė per pirmąsias 10 ms?

A Galime panaudoti lygtį $V = L\frac{dI}{dt}$

$$3 = 50\times10^{-3} \text{ (henrių)} \times \frac{dI}{0{,}01 \text{ (s)}}$$

Srovės padidėjimas per pirmąsias 10 ms = 0,6 A

Srovės kitimas grandinėse su induktoriumi

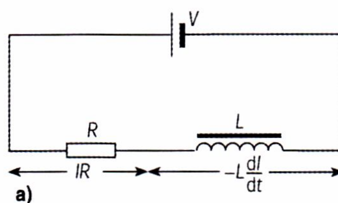
Galime laikyti induktorių esant panašų į variklį, aprašytą 272 p. Panašiai kaip varikliui, šaltinio elektrovarai priešinasi induktoriuje indukuota elektrovara. Srovė grandinėje randama pagal tokią lygtį:

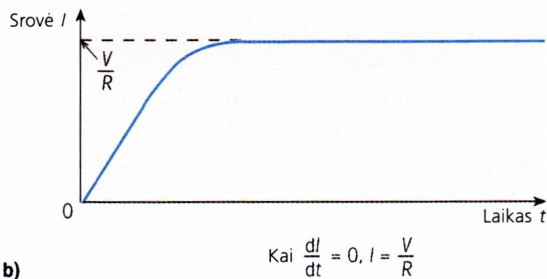
$$\text{srovė} = \frac{\text{šaltinio elektrovara} - \text{induktoriaus elektrovara}}{\text{visa grandinės varža,}}$$

arba simboliais $I = \dfrac{V - L\frac{dI}{dt}}{R}$

Pertvarkę gauname: $\dfrac{dI}{dt} = \dfrac{V - IR}{L}$

Tai yra pirmosios eilės diferencialinė lygtis, kurią galima išspręsti taikant integralinį skaičiavimą. Šios lygties sprendinys yra kita lygtis, aprašanti eksponentinį srovės didėjimą, pavaizduotą grafike 12.21 pav.





12.21 pav.
a) **Grandinė su induktoriumi;**
b) **srovės kitimas grandinėje**

Solenoido induktyvumas

Solenoide indukuotą elektrovarą apibrėždami dviem būdais – remdamiesi Faradėjaus dėsniu ir išreiškę induktyvumu – galime išvesti solenoido induktyvumo formulę. Šioji labai naudinga, kai reikia pagaminti reikiamo induktyvumo rites. Solenoide indukuojama elektrovara gaunama pagal lygtį:

$$\epsilon_i = L\frac{dI}{dt} = N\frac{d\phi}{dt},$$

Solenoidui $\phi = \mu_0\mu_r\frac{NA}{l}I$

Taigi $\dfrac{d\phi}{dt} = \mu_0\mu_r\dfrac{NA}{l}\dfrac{dI}{dt}$

ir $N\dfrac{d\phi}{dt} = \mu_0\mu_r\dfrac{N^2A}{l}\dfrac{dI}{dt}$

Palyginus su pirmąja lygtimi, $\boldsymbol{L = \mu_0\mu_r\frac{N^2A}{l}}$

PAVYZDYS

K Ritė iš elektroninių elementų katalogo turi 100 μH induktyvumą. Joje yra 10 laido vijų, tenkančių 1 cm ilgiui, ant 0,25 cm² skerspjūvio ploto šerdies. Įrodykite, kad šerdies medžiagos santykinė magnetinė skvarba yra maždaug 320.

A Naudojame ritės savojo induktyvumo lygtį:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 A}{l}$$

Pertvarkę gauname: $\mu_r = \dfrac{Ll}{\mu_0 N^2 A}$

$$= \frac{1\times10^{-4}\times0{,}01}{4\pi\times10^{-7}\times10^{2}\times0{,}25\times10^{-4}}$$

$$= 10^3/\pi$$

Santykinė magnetinė skvarba = 318

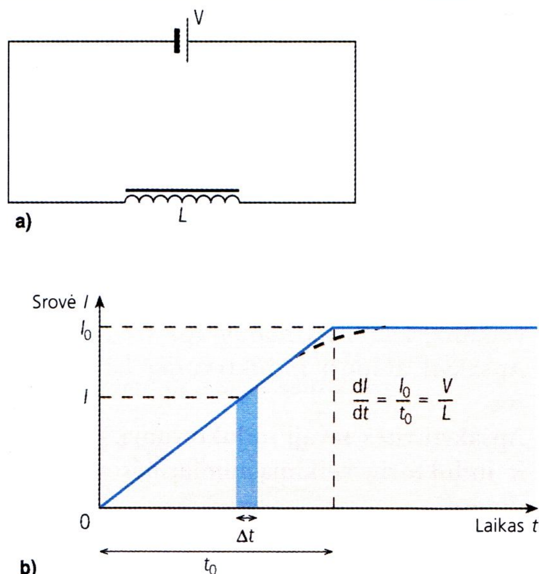
10 INDUKTORIUJE SUKAUPIAMA ENERGIJA

Didėjant srovei induktoriuje, magnetiniame lauke aplink induktorių kaupiasi energija. Srovei pasiekus pastovią vertę, energijos daugiau nebekaupiama. Išjungus srovę, magnetinis laukas išnyksta, o energija išsiskiria kaip indukuota didelė elektrovara, kuri įžiebia neoninę lemputę 12.20 pav.

Energijos, sukauptos induktoriaus magnetiniame lauke, skaičiavimas

Kai induktorius prijungiamas prie energijos šaltinio, iš pradžių energijos šaltinis atlieka darbą, įveikdamas elektrovarą, indukuotą induktoriuje, kad sukurtų magnetinį lauką. Kai tai vyksta, magnetiniame lauke kaupiama energija. (Kai srovė induktoriuje yra nusistovėjusi, energijos šaltinis vis dar atlieka darbą įveikdamas elektrinę varžą, – t. y. kaitindamas.)

Vadinasi, jei norime apskaičiuoti sukauptą induktoriuje energiją, turime nagrinėti, kas atsitinka, srovei išaugus iki maksimalios vertės.



12.22 pav. **Apskaičiuojama induktoriuje sukaupta energija**

Energija, suteikta per sekundę, arba galia vatais, gaunama pagal

$$W = VI,$$

kur I yra srovė tuo metu.

Galia taip pat lygi nedideliam energijos kiekiui ΔE, kuris sukaupiamas per laiką Δt. Todėl

$$VI = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

arba $\Delta E = VI\Delta t$

$I\Delta t$ atitinka nuspalvintą plotą, pavaizduotą supaprastintame induktoriaus srovės augimo grafike 12.22b) pav.

Visa energija yra suma visų plotelių, sudarančių plotą po kreive, srovei didėjant iki jos galutinės vertės I_0.

visas plotas = $\frac{1}{2} I_0 t_0$,

kur t_0 yra laikas, kuris trunka, kol srovė pasiekia didžiausią vertę I_0.

Tai reiškia, kad visa energija gali būti užrašyta taip:

$$E = ½VI_0t_0$$

Bet šios kreivės dalies gradientas, dI/dt, yra gaunamas pagal

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I_0}{t_0} = \frac{V}{L}$$

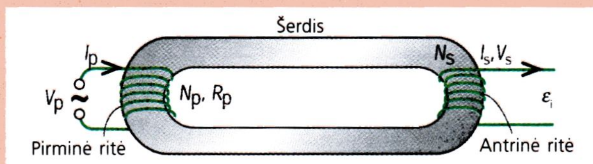
taigi $Vt_0 = I_0L$

Dabar galime visą energiją užrašyti taip:

$$E = ½I_0I_0L = ½I_0^2L$$

Arba $\mathbf{E = ½I_0^2L}$

Transformatorius



12.23 pav. **Transformatorius**

Originalūs Faradėjaus bandymai pademonstravo transformatoriaus veikimą. Jei srovė pirminėje ritėje nuolat kinta, tai jos kuriamas srautas irgi nuolatos kis. Tai reiškia, kad antrinėje ritėje bus indukuojama nenutrūkstama, tačiau kintanti srovė.

Transformatoriai plačiai naudojami kintamajai įtampai keisti: **aukštinantys** ir **žeminantys** transformatoriai didina arba mažina įtampas:

$$V_p/V_a = N_p/N_a$$

Dauguma iš tinklo maitinamų elektroninių prietaisų turi žeminantįjį transformatorių, tiekiantį žemesnę įtampą, reikalingą elektroninei grandinei. 13 skyriuje aptarsime abu transformatoriaus tipus, jų naudojimą perduodant elektros energiją.

Antrinėje ritėje indukuojama elektrovara gaunama pagal lygtį

$$\epsilon_i = L\frac{dI}{dt} = N\frac{d\phi}{dt},$$

Pirminė turi N_p vijų ir R_p omų varžą. Taigi prijungtoji įtampa bet kuriuo momentu yra tokia:

$$V_p = I_p R_p + N_p\frac{d\phi}{dt},$$

kur I_p yra atitinkama srovės pirminėje ritėje vertė. Jei šerdis yra trumpa ir stora, tai nedidelė srovė sukurs didelį srautą, kadangi $I_p R_p$ yra mažas. Šiuo atveju

$$V_p \approx N_p\frac{d\phi}{dt}$$

Jei ϵ_i lygtį padalytume iš V_p lygties, gautume

$$\frac{\epsilon_i}{V_p} \approx \frac{-N_a(d\phi/dt)}{N_p(d\phi/dt)} \approx -\frac{N_a}{N_p}$$

N_a/N_p vadinamas **vijų santykiu.**

Gerai pagaminti transformatoriai yra labai efektyvūs, taigi galime pakeisti ženklą „apytiksliai“ ženklu „lygu“:

$$\frac{\epsilon_i}{V_p} = -\frac{N_a}{N_p}$$

Labai efektyviam transformatoriui galime rašyti:

Energija į pirminę ritę = energija iš antrinės ritės

Energija per sekundę yra galia, todėl

$$I_p V_p = I_a \epsilon_i$$

arba

$$\frac{I_a}{I_p} = \frac{V_p}{\epsilon_i} = \frac{N_p}{N_a}$$

Kitaip tariant, jei transformatorius paaukština įtampą, tai srovė bus žeminama, ir atvirkščiai.

■ Žr. 9 klausimą.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių, turėtumėte sugebėti:

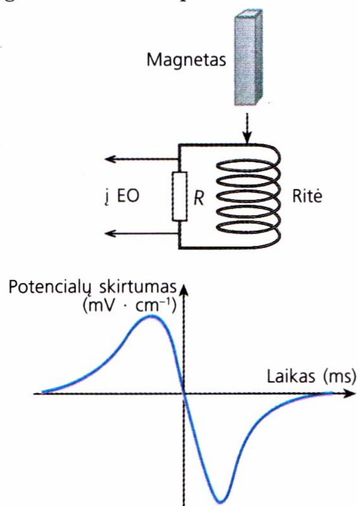
- Apsakyti Faradėjaus bandymus su elektromagnetine indukcija.
- Suprasti Faradėjaus elektromagnetinės indukcijos dėsnį $\epsilon = N(d\phi/dt)$
- Panaudoti lygtį $V = Blv$ judančiame laide indukuotai elektrovarai apskaičiuoti.
- Apibrėžti magnetinį srautą kaip vertikaliosios lauko stiprio dedamosios ir ploto, kurį ji kerta, sandaugą.
- Panaudoti Lenco dėsnį indukuotos srovės krypčiai numatyti.
- Apsakyti paprasto variklio su judama rite elgseną.
- Palyginti magnetines grandines su elektrinėmis grandinėmis.
- Panaudoti lygtį $NI = (\phi l)/(\mu_0 \mu_r A)$ magnetinio lauko stipriui solenoide ir aplink laidą apskaičiuoti.
- Apsakyti, kaip indukuojamos sūkurinės srovės, ir pateikti jų poveikio pavyzdžių.
- Apsakyti paprasto nuolatinės srovės variklio veikimą, kai yra kintama apkrova.
- Apsakyti abipusį induktyvumą tarp ričių poros.
- Apsakyti ritės savąjį induktyvumą $V = L\,dI/dt$, ir induktorių veikimą nuolatinės srovės grandinėse.
- Apskaičiuoti energiją, sukauptą induktoriaus magnetiniame lauke.
- Apsakyti paprasto transformatoriaus veikimą.

KLAUSIMAI

1 Lėktuvas, skrendantis šiaurės kryptimi, statmenai kerta Žemės magnetinį lauką. Visas sparnų ilgis yra 30 metrų, ir lėktuvas skrenda 200 m · s^{-1} greičiu. Žemės magnetinio lauko stipris yra $4{,}3 \times 10^{-5}$ T. Apskaičiuokite elektrovarą, indukuojamą išilgai sparnų galų.

2 Magnetas numetamas taip, kad kristų vertikaliai pro ritę, kaip atvaizduota 12.K2 pav. Parodytas pėdsakas, gautas osciloskope.

12.K2 pav.



a) Paaiškinkite pėdsako formą.
b) Kodėl neigiamoji smailė didesnė už teigiamąją smailę?
c) Ką reiškia plotai, esantys po kiekviena smaile?

3 Fizikė nutarė įvertinti srovę, indukuojamą jos vestuviniame aukso žiede, greitai pasukus ranką 90°. Skaičiavimai prasideda šitaip, tačiau yra nebaigti.
Žemės laukas $B = 6 \times 10^{-5}$ T [1]
Kertamas plotas = 2 cm^2 = 2×10^{-4} m^2 [2]
Vadinasi, maksimalus galimas lauko B srauto pokytis pajudinus ranką yra toks
$(6 \times 10^{-5}\ \text{T})\ (2 \times 10^{-4}\ \text{m}^2) = 12 \times 10^{-9}\ \text{T} \cdot \text{m}^2$ [3]
Judesiui sugaišus laiką 0,2 s, vidutinė indukuotoji elektrovara yra tokia:

$$\frac{12 \times 10^{-9}\ \text{T} \cdot \text{m}^2}{0{,}2\ \text{s}} = 6 \times 10^{-8}\ \text{V} \qquad [4]$$

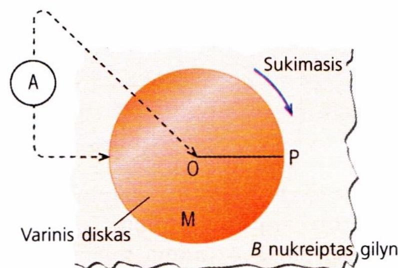
a) 12.K3 pav. vaizduoja žiedo tūrinį brėžinį. Nukopijuokite jį ir parodykite jame plotą, skaičiavime pažymėtą kaip 2 cm^2.

12.K3 pav.



b) Ką dar reikia įvertinti, kad indukuotosios srovės skaičiavimas būtų baigtas?
c) Šiuolaikiniai vestuviniai aukso žiedai kartais būna storesni už tą, kurį mūvėjo ši fizikė. Paaiškinkite, kaip toks storesnis žiedas paveiktų
(i) indukuotąją elektrovarą;
(ii) indukuotąją srovę.
d) Kokia prielaida daroma 3 žingsnyje apie žiedo orientavimo plokštumą Žemės B lauke
(i) iš pradžių;
(ii) pasukus ranką?

4 12.K4 pav. atvaizduotas 120 mm spindulio varinis diskas, esantis vienalyčiame $1{,}5 \times 10^{-2}$ T magnetiniame lauke B, nukreiptame į brėžinio plokštumą. Diskas sukamas aplink per jo centrą O einančią ašį 2500 apsukų per minutę dažniu.

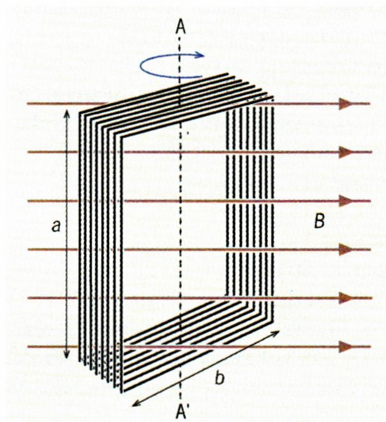


12.K4 pav.

a) Apskaičiuokite magnetinį srautą, kertamą spindulio OP per 1 s.
b) Nuo slankaus kontakto, liečiančio kraštą taške M, sudaryta stacionari jungtis per ampermetrą A iki panašaus kontakto disko centre. Tai pažymėta brėžinyje brūkšnine linija. Šitos jungties MAO varža yra 0,10 Ω, o varža tarp krašto ir disko centro yra nykstamai maža. Apskaičiuokite srovės pro A didumą.
c) Paaiškinkite, ar laidumo elektronas variniame diske dėl savo judėjimo magnetiniame lauke patirs magnetinės kilmės jėgą, nukreiptą link disko centro, ar link krašto. Nustatykite srovės pro A kryptį.

5 Plokščia stačiakampė ritė, kurios kraštinės a ir b, sukama dažniu f aplink ašį AA′, kuri statmena vienalyčiam magnetiniam laukui B. Ritė turi n vijų. Iš punktų nuo A iki E (kitame puslapyje) išsirinkite, kokiu atveju kintamos elektrovaros didžiausia vertė ritėje padvigubės.

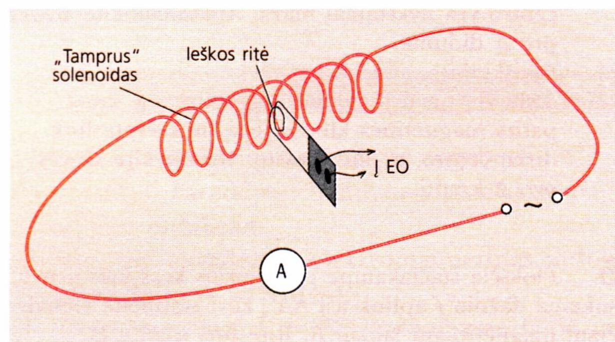
A Ir a, ir b padvigubinamos.
B f padidinamas $\sqrt{2}$ kartų.
C B sumažinamas perpus.
D n padvigubinamas.
E f sumažinamas perpus.



12.K5 pav.

6 12.K6 pav. atvaizduotas ilgas „tamprus“ solenoidas su jame visą laiką tekančia kintama srove. Maža ritė, vadinama ieškos rite, turi daug vijų ir fiksuotą skerspjūvio plotą. Ieškos ritė patalpinama solenoide magnetinio lauko stipriui matuoti. Nusakykite, kaip šitokie pokyčiai paveiktų srautą solenoide ir elektrovarą, indukuojamą ieškos ritėje:

a) Srovę solenoide padidinus dvigubai.
b) Solenoidą ištempus tiek, kad ritės būtų dvigubai toliau viena nuo kitos.
c) Srovę ir tarpą tarp ričių padvigubinus.
d) Ieškos ritę pakeitus kita, su tokiu pačiu vijų skaičiumi, bet dvigubai didesnio skerspjūvio ploto.

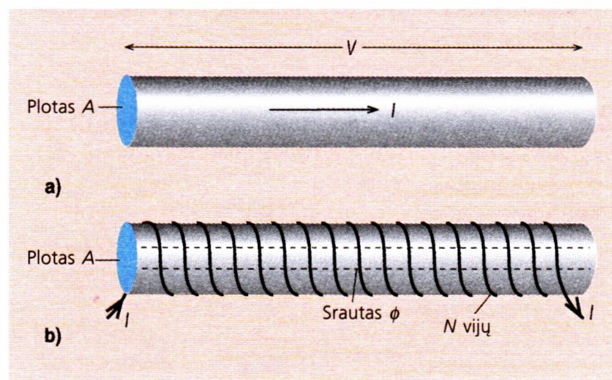


12.K6 pav.

7 12.K7a) pav. potencialų skirtumas V sukelia ilgame geležiniame strype srovę I, o strypo varža yra V/I. 12.K7b) pav. srovės vijos NI apie strypą sukelia strype srautą ϕ, o strypo magnetinė varža yra NI/ϕ.

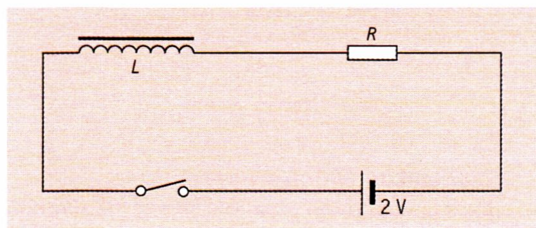
Jei skerspjūvio plotas A būtų padvigubintas (išliekant tam pačiam ilgiui, kuris yra daug didesnis už skersmenį), kiek kartų iš pateiktųjų žemiau punktų nuo A iki E: **a)** padidės strypo *varža*, **b)** padidės strypo *magnetinė varža?*

A $\frac{1}{4}$
B $\frac{1}{2}$
C 1
D 2
E 4



12.K7 pav.

8 Sujungus jungiklį grandinėje 12.K8 pav., srovė palaipsniui pakyla iki 0,25 A per pirmąją 0,01 sekundės. R yra 0,1 Ω, o L varža yra nykstamai maža.



12.K8 pav.

a) Įsitikinkite, kad L induktyvumas yra apie 80 mH.
b) Jei R padidinama iki 0,2 Ω, kas bus su iki tol didėjusia srove?
c) Tada R padidinama iki 2 Ω. Koks dabar yra srovės didėjimo greitis?
d) L yra pakeičiama 1,0 H induktyvumo rite, o R tebelieka 2 Ω. Apskaičiuokite pradinį srovės kilimą ir galutinę srovę grandinėje.

9 Žeminantysis transformatorius pažemina 240 V įtampą iki 12 V, kad didžiausiu ryškumu šviestų 12 V ir 36 W lemputė.

a) Koks yra transformatoriaus vijų santykis?
b) Kokia srovė teka transformatoriaus pirminėje ritėje?
c) Įsitikinkite, kad stebimoji pirminės ritės varža gaunama iš tokios lygties:

$$(\text{vijų santykis})^2 \times \text{varža antrinėje ritėje}$$

Laikykite pirminės ir antrinės ritės varžas nykstamai mažomis.

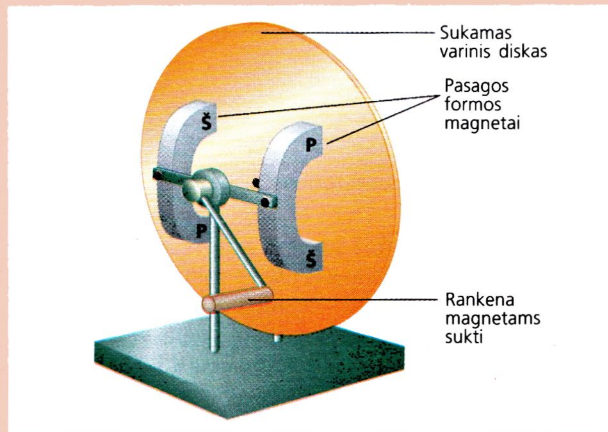
Užduotis

VARIKLIAI, SUTEIKIANTYS PASAULIUI DIDELĮ GREITĮ

1996 balandį žurnalo „New Scientist" buvo aprašytos naujos idėjos varžantis sukurti traukinius, galinčius važiuoti iki 500 km per valandą greičiu. Dabartinį rekordą yra pasiekęs Japonijos Maglev traukinys, išvystęs 517 km per valandą greitį. Panaši konstrukcija, pavadinta Serafimu, kuriama Meksikoje. Ir Maglev, ir Serafimo varymui naudojamos elektromagnetinės jėgos.

Visų magnetinės pagalvės traukinių pradinė idėja grindžiama **tiesiniu indukciniu varikliu**. Ta mintis yra tokia: panaudokite magnetą kintamajam magnetiniam laukui laidininke sukurti, ir indukuosite laidininke srovę. Tekant šiai srovei, laidininke bus magnetinis laukas, besipriešinantis magneto laukui, ir atsirandanti tarp magneto ir laidininko jėga gali būti panaudota judėjimui sukelti.

Apie 95 procentus pasaulio variklių dabar yra indukciniai varikliai, visi pagrįsti tuo, kad judantis magnetinis laukas gali būti panaudotas judėjimui sukelti.

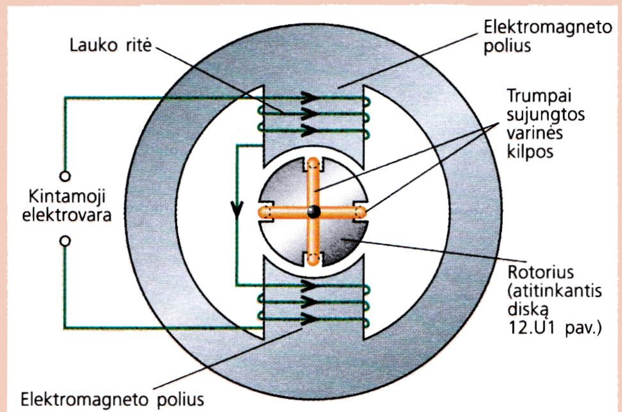


12.U1 pav. **Stendas judančio lauko indukuotam judėjimui demonstruoti**

Magnetai 12.U1 pav. yra sukami, ir judantis laukas indukuoja metaliniame diske sroves, sukeliančias besipriešinantį lauką.

1 Nurodykite kokius nors srovės kelius metaliniame diske ir naudodamiesi Lenco taisykle paaiškinkite, kodėl metalinis diskas turėtų imti suktis paskui besisukančius magnetus.

Kad pagamintume tinkamą variklį, veikiantį šiuo principu, turime sukurti judantį magnetinį lauką kitaip, negu tiesiog fiziškai judindami magnetus. Prijungiame kintamąją elektrovarą. Taip sukuriamas kintamasis magnetinis laukas, t. y. laukas, kuris kinta. 12.U2 pav. atvaizduota galima schema.



12.U2 pav. **Vienfazis variklis, kuris pasirodo besąs labai menkas variklis, kadangi nesisuka!**

Nors yra dvi ritės, magnetinis laukas abiejose yra tokios pat fazės.

2 Strėliukės diagramoje rodo srovės kryptį tam tikru laiko momentu. Kokią įtaką tai turės dviems elektromagneto „lauko ričių" poliams?

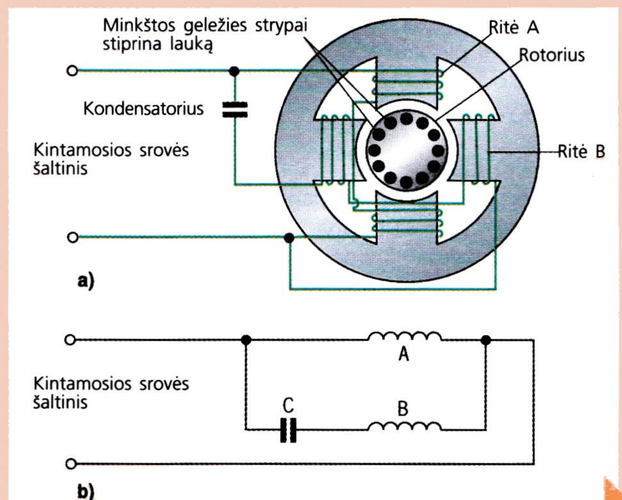
Šio variklio rotorius sudarytas iš dviejų uždarų varinių kilpų, kurių varža labai maža.

3 Besikeičiantis laukas lauko ritėse indukuos srovę tik vienoje iš kilpų, pavaizduotų 12.U2 pav. Kurioje ir kodėl?

Indukuotoji srovė sukelia savąjį magnetinį lauką, tačiau nėra sukimo jėgos (momento), taigi rotorius savaime neišsijudina. Jei jis būtų stumtelėtas, galėtų tęsti sukimąsi. Yra du būdai, kuriais šis „nenusisekęs" variklis gali būti priverstas veikti, t. y. rotorius priverstas savaime suktis!

Dvifazis variklis

Pirmasis būdas – panaudoti kondensatorių, keičiantį srovės fazę antrojoje lauko ritėje, kuri įtaisoma statmenai pirmajai, kaip 12.U3 pav.

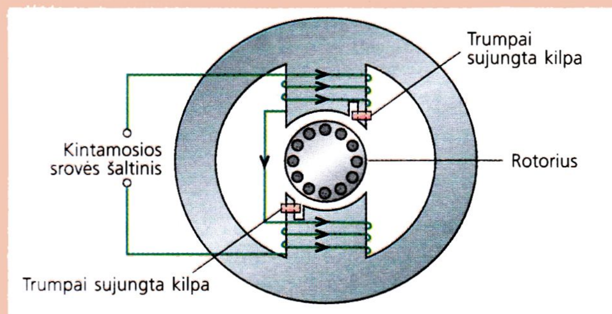


12.U3 pav. a) **Dvifazė mašina ir** b) **dviejų ričių elektrinė grandinė**

Kondensatorius, sujungtas nuosekliai su antrąja rite, pakeičia joje srovės fazę, ir ji nesutampa su srove pirmojoje ritėje (žr. 289 p.). Rezultatas – srovės, indukuotos rotoriaus kilpose, irgi bus skirtingų fazių, ir susidarys sukamoji jėga. Kondensatorius paverčia variklį dvifaze mašina. Praktikoje fazių skirtumas niekada nesiekia 90°. Veikiant skirtingų fazių magnetiniams laukams, jie tarytum sukasi aplink rotorių.

Variklis su „ekranuotu poliumi"

Antrasis būdas pagaminti veikiantį variklį yra panaudoti „ekranuotą polių".



12.U4 pav. **Ekranuotų polių variklis**

Ekranuotų polių variklis turi dvi trumpai sujungtas kilpas ant išdrožos kiekviename elektromagneto poliuje. Jos „ekranuoja" poliaus dalį su išdroža. Šioji trumpai sujungta kilpa yra „magnetiškai" susieta su lauko rite ant kiekvieno poliaus, kadangi jos turi bendrą geležinę šerdį.

4

a) Kokia bus srovės, indukuojamos trumpai sujungtoje kilpoje, kryptis atžvilgiu srovės, esančios lauko ritėje ant kiekvieno poliaus?

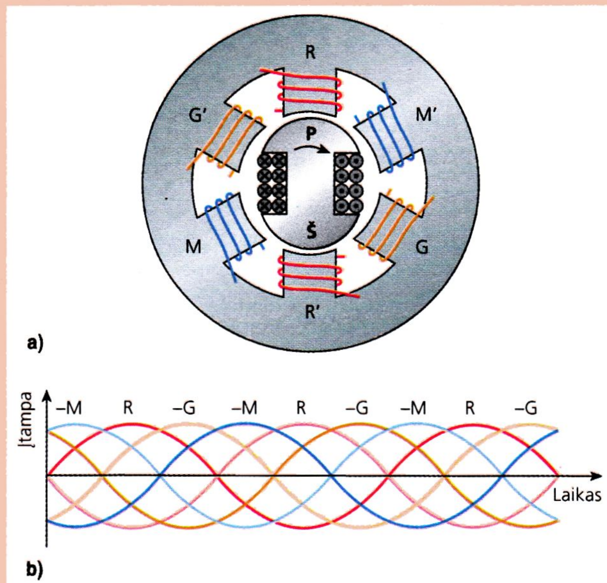
b) Koks bus magnetinio lauko virš neekranuotos dalies santykis su magnetiniu lauku virš ekranuojamos kiekvieno poliaus dalies?

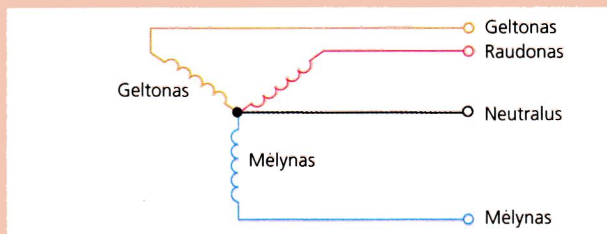
Ekranuojantis žiedas paverčia variklį dvifaze mašina. Tokie varikliai plačiai naudojami ten, kur varikliui reikia suktis pastoviu greičiu, bet nereikia atlikti daug darbo. Grotuvas yra geras pavyzdys.

Trifazis variklis

Taikymuose, kur reikia daugiau energijos, naudojamas trifazis variklis. Privalumas yra tas, kad jėgainėse elektros energija iš tiesų gaminama trifazė.

12.U5 pav. atvaizduotas supaprastintas trifazis generatorius. Srovių, indukuojamų trijose vienodais tarpais esančiose ritėse, fazės skirsis 120°. Ritės generatoriuje dažniausiai sujungiamos „žvaigždės" pavidalu. Tai reiškia, kad iš generatoriaus imti energijai reikia keturių laidų, – po vieną kiekvienai iš trijų fazių, o ketvirtasis – „neutralus".



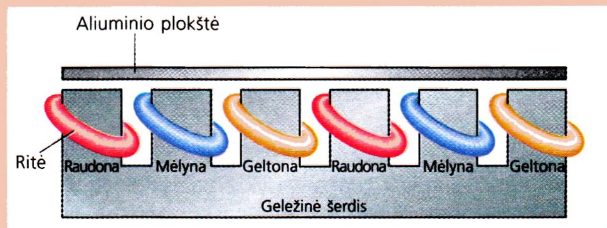


12.U5 pav. **Trifazis generatorius. Kai sukamas magnetas (čia – elektromagnetas) juda, jis indukuoja srovę kiekviename ričių rinkinyje, RR', MM', GG', paeiliui: tos trys fazės yra raudona, mėlyna ir geltona**

12.U6 pav. **Trifazio generatoriaus žvaigždinis sujungimas ir laidai**

Trifazis indukcinis variklis turi tris ričių rinkinius, kurių kiekvienas jungiamas prie skirtingos šaltinio fazės. Šį kartą fazė tarp magnetinio lauko, sukuriamo kiekvienos ritės, yra lygiai 120°. Tai sudaro labai gerą besisukantį magnetinį lauką bei variklį, galintį sukurti labai dideles sukimo jėgas.

Įsivaizduokite šio variklio rites „ištiesintas", kaip kad 12.U7 pav. Rotorius pakeičiamas aliuminio plokšte, esančia virš ričių.

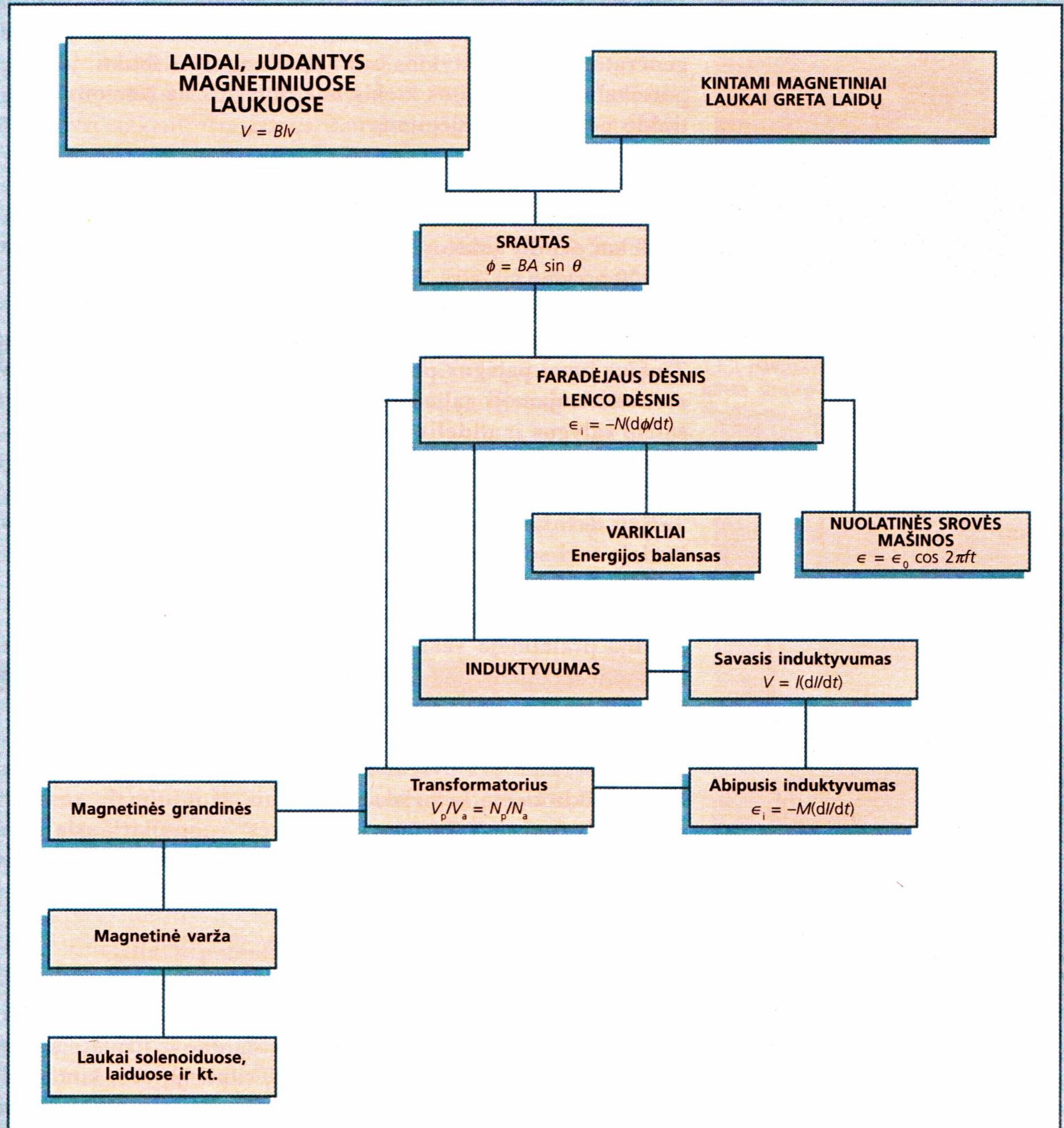


12.U7 pav. **Tiesinis variklis: „ištiesintas" indukcinis variklis, parodant ričių išsidėstymą ant geležinės šerdies**

5 Kas atsitiks plokštei, kai bus įjungtas trifazis maitinimas? Įsivaizduokite, kad ritės sumontuotos traukinyje, kuris važiuoja aliumininiu bėgiu. Kai bus tiekiama energija, traukinys „pakibs" virš bėgio ir judės išilgai jo. Tai ir yra principas, kuriuo pagrįsti Maglev ir Serafimas.

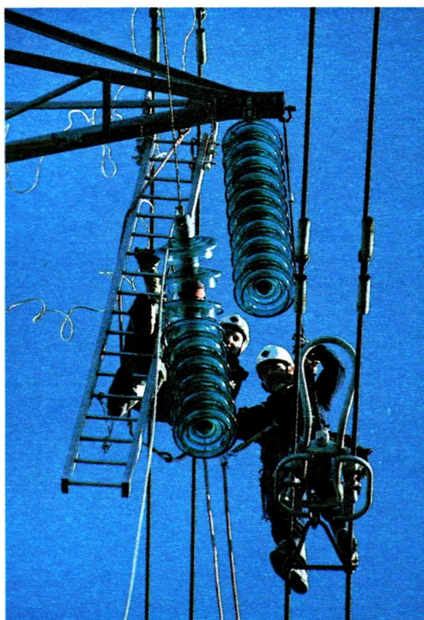
ELEKTROMAGNETINĖ INDUKCIJA

Pagrindinės sąvokos ir lygtys, kurių mokėtės šiame skyriuje, sudėtos į šią skyriaus schemą. Įrémintų dalių saitai rodo ryšius tarp sąvokų. Pasinaudokite šia schema kartodami kursą ir pasitikrinkite, ar nereikia kurios nors srities pasimokyti nuodugniau.



13 Kintamoji srovė ir elektros energija





Nuolatinis Nacionalinio tinklo stebėjimas ir priežiūra.
Viršuje: valdymo patalpa
Apačioje: remontuojama perdavimo linija

1996 m. VASARIO 5-oji buvo viena šalčiausių dienų Jungtinėje Karalystėje per daugelį metų. Tą dieną elektros energijos generatoriai ir skirstyklos buvo pasirengusios laukti, jog pareikalautas energijos kiekis bus didesnis už Nacionalinio tinklo perdavimo pajėgumą.

Nacionalinis tinklas yra vienas didžiausių įrangos agregatų šalyje. Tai labai lanksti, integruota sistema, turinti apie 7000 km orinių aukštos įtampos perdavimo linijų, palaikomų 20 000 atramų, ir virš 500 km požeminių kabelių.

Dienai baigiantis operatoriai galėjo su palengvėjimu atsipūsti. Tinklas buvo pajėgus perduoti iš viso 57 gigavatus, o didžiausia reikalaujamoji galia tepasiekė 48 750 megavatų. Ypatingo šalčio sąlygos ir didelis elektros vartojimas pasitaiko gana retai, ir tinklas atlaikė išbandymą.

Tačiau dažniau pasitaiko ir lengviau numatomų poreikių, su kuriais turi susitvarkyti tinklo operatoriai. Karališkosios šeimos vestuvės ir tarptautinės futbolo rungtynės taip pat sukelia bangas, – poreikis iškart padidėjo 10 procentų, kai Anglija pralaimėjo Vakarų Vokietijai 1990-ųjų Pasaulio taurės rungtynėse, – paguodą teikiančių karštų gėrimų paruošimui ir kitokiai veiklai, kur vartojama elektra.

Dieną poreikiai yra dvigubai didesni negu naktį, o maksimalus poreikis žiemą keturiskart didesnis už minimalų vasarą. Antplūdis tuoj po „Karūnavimo gatvės“ (populiariausia JK muilo opera, – *vert. past.*), kai milijonai žmonių įsijungia savo elektrinius virdulius, yra gerai žinomas planuotojams!

Įžanga

Kintamoji srovė yra labai svarbi elektroninėse ir fizinėse sistemose. Mikrofonas paverčia garsą, sukeltą vibracijų ore, kintamosios srovės signalu. Garsiakalbis, prijungtas prie kintamosios srovės šaltinio, vėl paverčia signalą garsu. Elektromagnetinės bangos, spinduliuojamos iš transliuojančios antenos, yra sukuriamos kintamųjų srovių, o signalas, pagautas imtuvo antenos, yra kintamoji srovė. Greitį, kuriuo kompiuteris vykdo instrukcijas, lemia kintamosios srovės, kurią kuria mažyčio kvarco kristalėlio vibracijos, dažnis.

Vidutinę dieną Jungtinės Karalystės jėgainių galia yra daugiau nei 60 gigavatų, ir šią energiją kintamoji srovė perduoda vartotojams. Kintamosios srovės grandinės yra svarbus klausimas, norint suvokti tiek Nacionalinį tinklą, tiek radijo imtuvo konstrukciją.

✓ Jugtinėje Karalystėje tinklo vardinė įtampa dabar lygi 230 V, tačiau elektros skirstyklose jos leistinos ribos nuo 253 V (+10%) iki 216 V (–6%).

1 KINTAMOSIOS ĮTAMPOS IR SROVĖS

„Įtampa“ iš baterijos yra pastovi, – t. y. ji varo pastovią, arba nuolatinę, srovę grandine. Tai reiškia, kad krūvis juda viena kryptimi. 13.1 pav. parodyta srovė (arba įtampa) laikui bėgant nekinta. Tai yra idealizuota situacija, kadangi tikrovėje srovė iš realios baterijos palaipsniui mažėtų, baterijai „išsikraunant“.

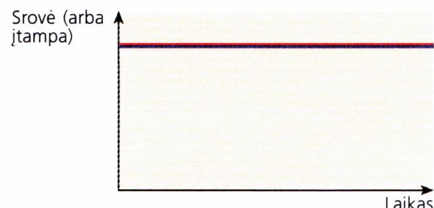
Elektros energija, kurią gauname iš „tinklo“, yra kintamoji įtampa. Ji varo **kintamąją srovę** grandine.

Kintamoji srovė nuolat keičia kryptį: žr. 13.2 pav., kur atvaizduota srovė, tekanti Jungtinės Karalystės Nacionalinio tinklo grandinėje.

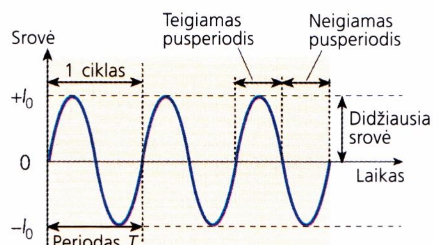
Kintamoji srovė turi būdingą **bangos formą,** kuri nuolatos pasikartoja: grafike atvaizduoti trys ciklai. Tinklo kintamosios srovės ciklas kartojasi 50 kartų per sekundę, – srovė yra 50 Hz dažnio. Vienas ciklas užtrunka vieną penkiasdešimtąją sekundės dalį, arba 0,02 s. Šis laikotarpis yra bangos formos **periodas.** Dar viena svarbi bangos formos charakteristika yra ta, kad kiekvienas periodas turi teigiamą ir neigiamą pusperiodį. Teigiamojo pusperiodžio metu srovė teka viena kryptimi; neigiamojo pusperiodžio metu srovės kryptis pasikeičia priešinga.

Elektros mašinos ar generatoriaus pagaminta kintamoji srovė kinta griežtai apibrėžtu būdu, – srovė kinta kaip sinusinė banga, – tokią formą jai suteikia ritė (žr. 166 p.). Taigi, kai I_0 yra maksimali srovė, o f yra srovės dažnis,

$$I = I_0 \sin 2\pi ft$$



13.1 pav. **Nuolatinė srovė nekinta, laikui bėgant**



13.2 pav. **Kintamoji srovė. Ši srovė kinta sinusoidiškai, su teigiamu ir neigiamu pusperiodžiais pakaitomis**

■ Žr. 1 klausimą.

2 GALIA KINTAMOSIOS SROVĖS GRANDINĖSE

13.3 pav. atvaizduotos dvi paprastos grandinės, kuriose lemputė įžiebiama iš kintamosios srovės šaltinio ir iš nuolatinės srovės šaltinio. Kiekvienu atveju šaltinis tiekia energiją lemputei, lemputė kaista ir skleidžia šviesą.

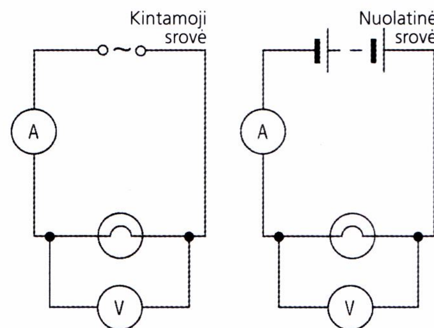
Nuolatinės srovės grandinės energiją, perduotą lemputei kiekvieną sekundę (galią) galima rasti naudojantis lygtimi

Galia = potencialų skirtumas × srovė

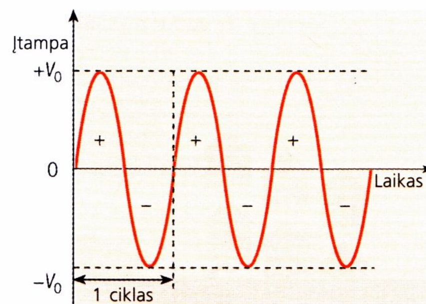
Energija perduodama taip pat ir kintamosios srovės grandinėje. Tačiau tos pačios lygties negalima naudoti. Jei srovė ir įtampa nuolatos kinta, tai kurią srovės ir įtampos vertę naudojame? Didžiausios vertės pasiekiamos tik du kartus per periodą. O kaip su vidutine verte? Kokia yra srovės ar įtampos vidutinė vertė per visą periodą? Pažvelkite į 13.4 pav. ir nuspręskite.

Atsakymas – nulis! Teigiamasis pusperiodis kompensuoja neigiamąjį.

Sprendimas yra toks: vietoj srovės nagrinėkime galią. Šitokioje paprastoje grandinėje srovė ir įtampa kinta drauge, viena ir kita didėdamos ir mažėdamos tuo pat metu. Sakome, kad jos viena su kita yra **tos pačios fazės**. Jei padauginsime srovės vertę bet kuriuo momentu iš atitinkamos įtampos, gausime galią tuo laiko momentu. Rezultatas toks, kaip vaizduojama 13.5 pav.

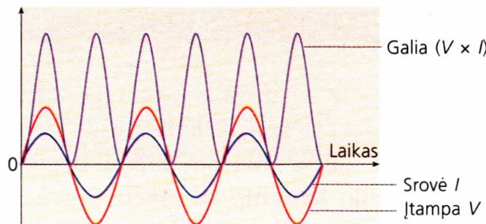


13.3 pav. **Paprastos kintamosios srovės ir nuolatinės srovės grandinės. Abiem atvejais lemputė šviečia: energija perduodama lemputei iš energijos šaltinio**



13.4 pav. **Trys kintamosios įtampos periodai. Sveikojo periodų skaičiaus vidurkis yra nulis**

13.5 pav. **Srovės, įtampos ir galios kitimas rezistoriuje trijų periodų metu. Galia visada teigiama**



Kadangi pavaizduotosios srovė ir įtampa yra sinusinės bangos, atitinkama galia yra sinuso kvadrato pavidalo banga. Atkreipkite dėmesį, kad kai srovė ir įtampa abi yra neigiamos, galia yra teigiama. Galia visuomet teigiama, nors ir ji kinta. Iš grafiko nesunku suprasti, jog vidutinė galios vertė yra ne nulis. Iš tiesų, skaičiavimai rodo, kad vidutinė sinuso kvadrato vertė yra pusė maksimumo, arba didžiausios vertės:

$$\text{vidutinė galia} = \frac{1}{2} \times \text{didžiausia galia}$$

$$= \frac{1}{2} \times (\text{didžiausia srovė} \times \text{didžiausia įtampa})$$

$$= (\frac{1}{\sqrt{2}} \times \text{didžiausia srovė}) \times (\frac{1}{\sqrt{2}} \times \text{didžiausia įtampa})$$

$$= \text{efektinė srovė} \times \text{efektinė įtampa},$$

kur

$$\text{efektinė srovė} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \text{didžiausia srovė}$$

$$\text{efektinė įtampa} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \text{didžiausia įtampa}$$

Atkreipkite dėmesį, kad čia panaudotas matematinis veiksmas

$$\tfrac{1}{2} = \tfrac{1}{\sqrt{2}} \times \tfrac{1}{\sqrt{2}}$$

„Efektinė“ kintamoji srovė ar įtampa faktiškai lygi nekintamai nuolatinei srovei ar įtampai, kuri lemputei perduoda tą patį energijos kiekį. Sakant „efektinė“, turima galvoje, kad iš tikrųjų tai tėra **kvadratinė šaknis** iš srovės ar įtampos kvadrato vidurkio. Be to,

$$\text{didžiausia srovė ar įtampa} = \sqrt{2} \times \text{efektinė vertė}$$
$$= 1{,}4 \times \text{efektinė vertė}.$$

3 EFEKTINĖS VERTĖS, KONDENSATORIAI IR DARBINĖS ĮTAMPOS

A Jungtinėje Karalystėje tinklo įtampa yra 230 V. Iš tikrųjų tai yra įtampos efektinė vertė. Kokia gi yra didžiausia vertė?

Žr. 2, 3 ir 4 klausimus. ■

Vardinės maitinimo šaltinių įtampos paprastai yra jų efektinės įtampos. Naudodami kondensatorių, turime būti tikri, kad neviršysime to kondensatoriaus darbinės įtampos (žr. 218 p.). Nuolatinės srovės grandinėse būtų apdairu nenaudoti įtampų, viršijančių maždaug du trečdalius vardinės kondensatoriaus darbinės įtampos. O su kintamosios srovės šaltiniu reikia elgtis dar atsargiau.

Pavyzdžiui, tarkime, kad kondensatoriaus darbinė įtampa yra 16 V. Jei toks kondensatorius būtų panaudotas grandinėje, maitinamoje iš 9 V nuolatinės srovės šaltinio, galėtume būti tikri, kad jis savo vaidmenį atliks gerai. Tačiau jei 9 V *kintamoji* įtampa yra to kondensatoriaus gnybtuose, tai didžiausia įtampa jame bus (9 × 1,4) arba 12,6 V. Tai mažiau kaip 16 V, bet apie 2 V aukščiau, nei du trečdaliai 16 V, kas yra 10,7 V. Geriau būtų naudoti kondensatorių, turintį didesnę vardinę darbinę įtampą.

B Kokios efektinės kintamosios įtampos didžiausia vertė yra didelesnė kaip 16 V?

4 ELEKTROS ENERGIJOS PASKIRSTYMAS – NACIONALINIS TINKLAS

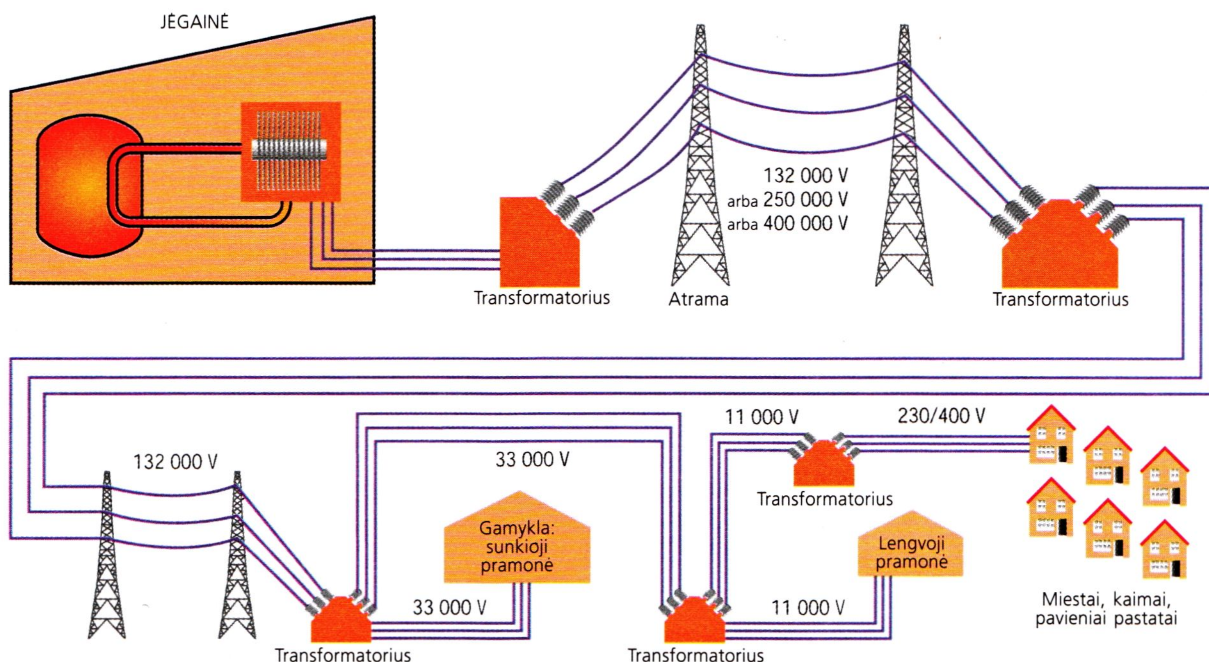
Nacionalinis tinklas yra sistema, naudojama elektros energijai skirstyti šalyje. Tai didelė ir labai sudėtinga grandinė, kuria jėgainės tiekia energiją kiekvienam vartotojui – fabrikui, ligoninei ar mokyklai.

Grandinės dydis kartais kelia sunkumų. Labiau nutolusiose Britų salų dalyse vartotojai gali būti iki šimto mylių nuo artimiausios jėgainės. Tokio ilgio kabeliai turi geroką varžą. Šiuose kabeliuose tekanti srovė juos kaitina, – yra **kaitimas dėl varžos**. Šis kaitimas – tai prarasta energija, švaistoma energija, kuri nepasiekia vartotojo.

Šie energijos nuostoliai dažnai vadinami I^2R nuostoliais, kadangi kabelyje su varža R, kuriuo teka srovė I, energijos nuostoliai dėl varžos yra I^2R (žr. 9 skyrių, 206 p.). Tai, kad energijos nuostoliai proporcingi I^2, reiškia, kad srovę sumažinus perpus energijos prarandama keturis kartus mažiau. Į tai atsižvelgta Nacionalinio tinklo konstrukcijoje (13.6 pav.), – elektra perduodama didesnės įtampos, kad srovės galėtų būti mažesnės. **Transformatoriai** panaudojami įtampai aukštinti ir žeminti, taip pat kaitalioti kintamąją srovę ir nuolatinę srovę.

Didžiausi šiuolaikiniai generatoriai gamina 25 000 V įtampos elektrą. Sunkioji pramonė vartoja 33 000 V įtampos elektrą, tuo tarpu lengvosios pramonės šakos vartoja 11 000 V. Mažesnieji vartotojai, kaip mūsų būstai, vartoja 230 V. Elektra perduodama šalies mastu daug didesnių įtampų – 132 kV, 250 kV ir 400 kV.

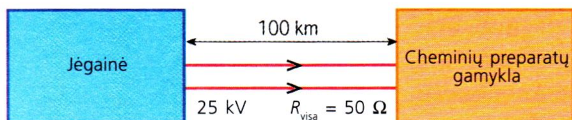
Vienas iš elektros generavimo kintamosios srovės pavidalu privalumų yra tai, kad transformatoriai lengvai ir efektyviai pakeičia kintamosios srovės įtampas (dideli transformatoriai paprastai turi 99 procentų naudingumo koeficientą). Aukštinantieji ir žeminantieji transformatoriai naudojami visoje sistemoje įtampoms keisti ir reikiamai įtampai gauti. (Atkreipkite dėmesį, kad „aukštinantys“ ir „žeminantys“ susiję su įtampomis, o ne su srovėmis.)



13.6 pav. **Nacionalinis tinklas, didelė sudėtinga grandinė, kuri tiekia energiją iš jėgainių vartotojui. Įvairiems vartotojams reikia tiekti skirtingų įtampų energiją**

PAVYZDŽIAI

K Jėgainė generuoja 100 A 25 kV srovę. Elektra perduodama 100 km energijos tiekimo linija į cheminių preparatų gamyklą. Visa energijos tiekimo linijos varža yra 50 Ω. Apskaičiuokite energiją, prarastą energijos tiekimo linijoje, ir naudingumo koeficientą procentais.



13.7 pav. **Jėgainės sistema**

A Energija iš jėgainės $= I \times V$

$= 100 \text{ A} \times 25\,000 \text{ V}$

$= 2\,500\,000 \text{ W}$

$= 2{,}5 \text{ MW}$

Energija, prarasta dėl tiekimo linijos kaitinimo $= I^2R$

$= 100^2 \times 50$

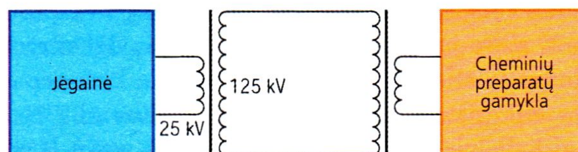
$= 500\,000 \text{ W}$

$= 0{,}5 \text{ MW}$

Tai reiškia, kad gamykloje gaunama tik 2,0 MW. Sistemos naudingumo koeficientas yra vos 80 procentų.

K Sistema patobulinama, papildant ją dviem transformatoriais: vienu – įtampai pakelti iki 125 kV, ir kitu – įtampai vėl pažeminti gamykloje. Pirmojo transformatoriaus vijų santykis yra 1:5; antrojo vijų santykis yra 5:1.

Kiek dėl to sumažės energijos nuostoliai? Koks yra naudingumo koeficientas procentais? (Darykime prielaidą, kad abu transformatoriai turi 100% naudingumo koeficientą.)



13.8 pav. **Du transformatoriai, kuriais patobulinta 13.7 pav. atvaizduota sistema**

A Įtampa pakeliama 5 kartus, taigi

srovė energijos tiekimo linijoje = 100/5 = 20 A

Energija, prarandama kaitinant energijos liniją $= I^2R$

$= 20^2 \times 50$

$= 20\,000 \text{ W}$

$= 0{,}02 \text{ MW}$

0,02 MW nuostolis mažesnis už 0,5 MW 25 kartus, arba 5^2. Tai reiškia, kad šiuo atveju gamykloje gaunama 2,48 MW. Sistemos naudingumo koeficientas sudaro 99,2 procento.

Elektra pramonėje

Daugeliui pramonės šakų, kurios vartoja elektrą, reikalingi didžiuliai energijos kiekiai. Imkime, pavyzdžiui, didelio masto aliuminio gamyklą, kur aliuminis elektrolitiškai išgaunamas iš išlydyto aliuminio oksido, gauto iš boksito rūdos. Tam procesui reikia beveik 1000 V nuolatinės srovės šaltinio ir 70 000 A srovės! Nuolatinės srovės įtampa imama iš antrinės žeminančiojo transformatoriaus ritės, kuri, tarkime, duoda antrinę 1000 V įtampą. Reikėtų šiek tiek atsižvelgti į vijų santykį ir pirminę srovę pirminėje transformatoriaus ritėje.

Tarkime, naudingumo koeficientas yra 100 procentų. Gamykla prijungta prie Nacionalinio tinklo per vietinę pastotę, tiekiančią išvade 33 000 V įtampą. Reikiamas vijų santykis būtų toks:

$$\frac{1000}{33\,000} = 1 : 33$$ – žeminantysis transformatorius

Kai įtampa yra žeminama, srovė bus aukštinama tuo pačiu santykiu. Tai yra,

$$\frac{\text{antrinė srovė}}{\text{pirminė srovė}} = \frac{33}{1}$$

Iš čia gauname: pirminė srovė = 70 000 / 33

= 2121,2 A

Tai vis dar didelė srovė, bet kur kas mažesnė nei 70 000 A, kuri reikalinga aliuminiui gaminti.

Šis pavyzdys būdingas daugeliui pramonės šakų, kurioms reikia tiekti tokios didelės įtampos elektros energiją.

?

C a) Koks yra vijų santykis, reikalingas paaukštinti generatoriaus įtampai nuo 25 000 V iki 250 000 V?

b) Kiek bus pakeičiama srovė šiame transformatoriuje? (Tarkime, transformatoriaus našumas yra 100 procentų.) Kaip tai paveiks energijos nuostolius kabelyje, kuriuo teka srovė iš transformatoriaus?

5 LYGINIMAS – KINTAMOSIOS SROVĖS KEITIMAS Į NUOLATINĘ SROVĘ

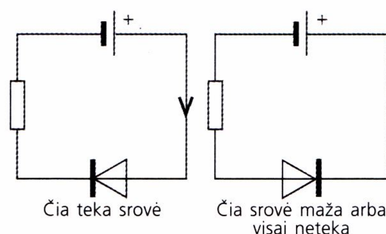
Daugeliui elektroninių prietaisų reikalingas nuolatinės srovės maitinimo šaltinis. Tai reiškia, kad, nepaisant elektros energijos perdavimo kintamosios srovės pavidalu privalumų, pirmas dalykas, kurį daugumai prietaisų reikia atlikti, yra paversti kintamąją srovę į nuolatinę srovę. Šis procesas yra vadinamas **lyginimu.** Vienas paprasčiausių būdų srovei lyginti – panaudoti **diodą.**

Diodai leidžia srovėms laisvai tekėti tik viena kryptimi (13.9 pav.). Diodo du laidai vadinami **anodu** ir **katodu.**

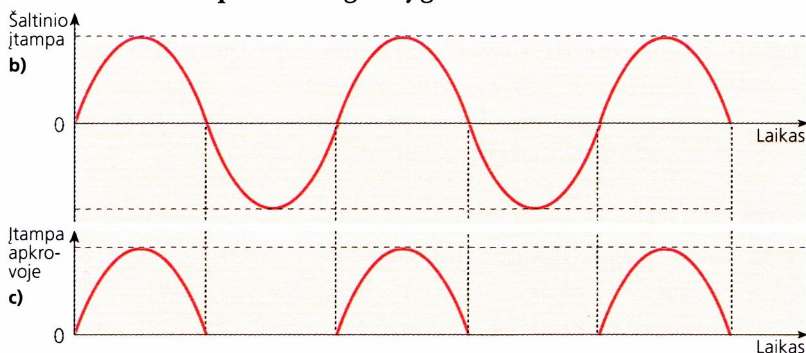
Panagrinėkime grandinę 13.9 pav. Diodas laidus tik tada, kai anodas teigiamas, t. y. tik teigiamųjų pusperiodžių metu. 13.10b) pav. atvaizduota kintamoji įtampa iš šaltinio ir įtampa (potencialų skirtumas) varžos *R* gnybtuose. Įtampą galima stebėti osciloskopu, prijungtu prie rezistoriaus.

Įtampa apkrovoje ir srovė joje nepastovios, bet jos tiesioginės. Tai yra, jos visada teigiamos, o krūvis juda viena kryptimi, – šioji nekinta. Ši paprasta grandinė tenkina poreikį versti kintamąją srovę tiesiogine srove, tačiau prarandama pusė energijos. Šis procesas vadinamas **pusės bangos lyginimu.**

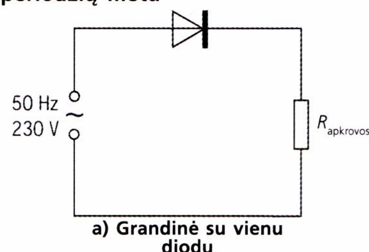




13.9 pav. **Šios dvi grandinės iliustruoja diodo veikimą. Diodas yra laidus tik kai anodas teigiamas**



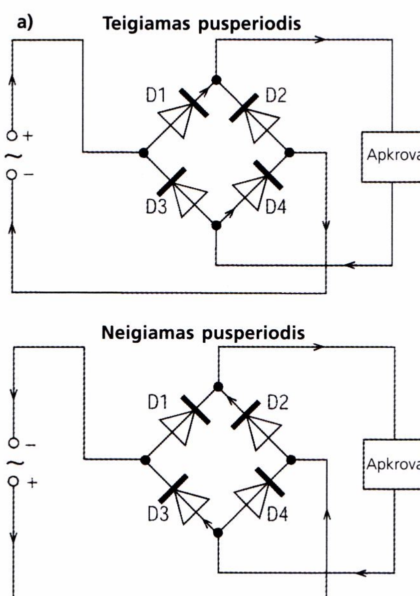
13.10 pav. **Pusės bangos lyginimas naudojant vienintelį diodą: kaip parodyta c), diodas laidus ir leidžia apkrova tekėti srovei tik teigiamųjų pusperiodžių metu**



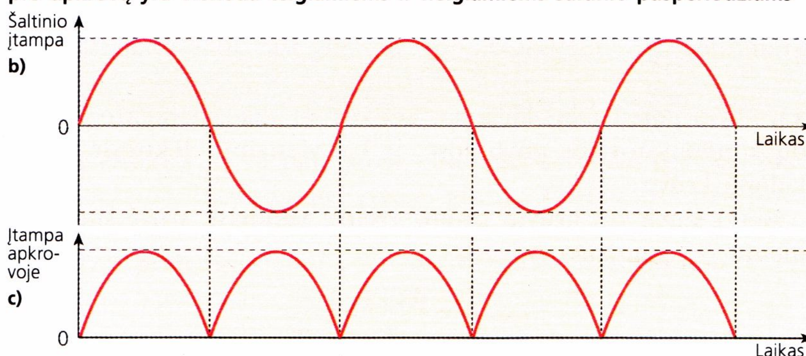
a) Grandinė su vienu diodu

13.11a) pav. grandinė yra žingsnis į priekį. Keturių diodų schema vadinama **lyginimo tilteliu,** ir ji jau atlieka visos bangos lyginimą. Diodai sujungti taip, kad krūvis praeina pro apkrovą vis ta pačia kryptimi per kiekvieną pusperiodį. Teigiamojo pusperiodžio metu laidūs diodai D1 ir D4; neigiamojo pusperiodžio metu laidūs yra diodai D2 ir D3.

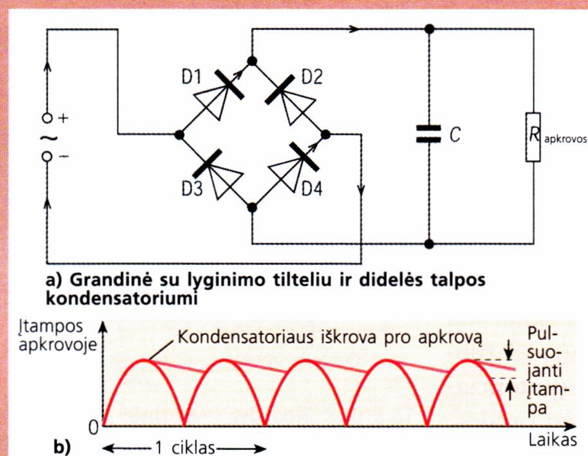
Srovė dabar nuolatinė. Ji nėra pastovi, bet apkrovoje jos kryptis ta pati visą kintamosios srovės veikimo ciklą. Kaip parodyta 13.11c) pav., įtampa yra „kuprota“, kur gūbrių dažnis yra dvigubai didesnis, nei pirmykštės kintamosios įtampos, pavaizduotos b).



13.11 pav. **Visos bangos lyginimas, panaudojant lyginimo tiltelį. Šį kartą srovė pro apkrovą yra vienoda teigiamiems ir neigiamiems šaltinio pusperiodžiams**



Visos bangos lygintuvo srovės tiesinimas



a) Grandinė su lyginimo tilteliu ir didelės talpos kondensatoriumi

b)

Pulsuojanti nuolatinė srovė gali būti išlyginta, įjungus didelės talpos kondensatorių į apkrovos grandinę kaip 13.12a) pav.

13.12b) pav. atvaizduota, kad per pirmojo periodo ketvirtį kondensatorius įsikrauna. Antrojo ketvirčio metu įtampa iš lyginimo tiltelio krinta, ir kondensatorius pradeda išsikrauti. Iškrovos greitis priklauso nuo kondensatoriaus talpos ir nuo apkrovos varžos, – nuo RC konstantos (žr. 9 skyrių, 220 p.).

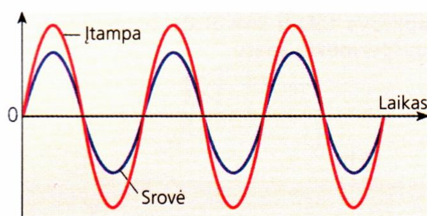
Jei RC didelė, lyginant su gūbrio periodu (1/gūbrio dažnis), tai gūbrys išnyks, ir įtampa bus išlyginta.

13.12 pav. **Visos bangos lyginimas mažinant pulsacijas. Kondensatorius sumažina išlygintos įtampos gūbrius.**

Žr. 5 klausimą. ■

6 REAKTYVIOJI VARŽA (REAKTANSAS)

Tokie elementai, kaip rezistoriai, kondensatoriai ir induktoriai, įjungti į kintamosios srovės grandines, yra daugelio naudingų prietaisų pagrindas. Srovės dydis pasirodo esąs priklausomas tiek nuo dažnio, tiek ir nuo elemento vardinio dydžio, ir tai galima panaudoti sudarant tokias grandines, kaip filtrai.



13.13 pav. **Grafikai vaizduoja, kaip srovė rezistoriuje ir įtampa jame kinta laikui bėgant. Jos yra vienodų fazių**

Rezistoriai

Omo dėsnis galioja kintamajai srovei lygiai taip pat, kaip ir nuolatinei srovei. Kintamoji srovė rezistoriuje yra tos pačios fazės kaip kintamasis potencialas jame (t. y. srovė ir įtampa kinta ta pačia faze, kaip parodyta 13.13 pav.). Varža omais nuolatinei srovei ir kintamajai srovei yra ta pati.

Kondensatoriai

Nuolatinės srovės grandinėse sakome, kad kondensatorius „blokuoja nuolatinę srovę“. Kitaip tariant, po pradinio trumpo įkrovos laikotarpio srovė neteka. Tarpe tarp elektrodų yra izoliatorius, – krūvis iš vieno elektrodo į kitą neteka.

Panašiai krūvis neteka tarp elektrodų, kai prijungiama kintamoji įtampa. Tačiau krūvis, tekantis į elektrodą ir iš jo, indukuoja krūvio tekėjimą kitam elektrode. Tai reiškia, kad likusioje grandinės dalyje teka srovė.

Tad kas gi atsitinka, kai prijungiame kintamąją įtampą prie grandinės su kondensatoriumi? Žinome, kad kondensatoriuje

$$Q = CV,$$

kur V yra potencialų skirtumas bet kuriuo laiko momentu C faradų kondensatoriaus gnybtuose, ir kai viename elektrode yra Q kulonų krūvis.

Betgi srovė yra krūvio srauto greitis, vadinasi, srovė šiuo momentu yra gaunama iš lygties

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

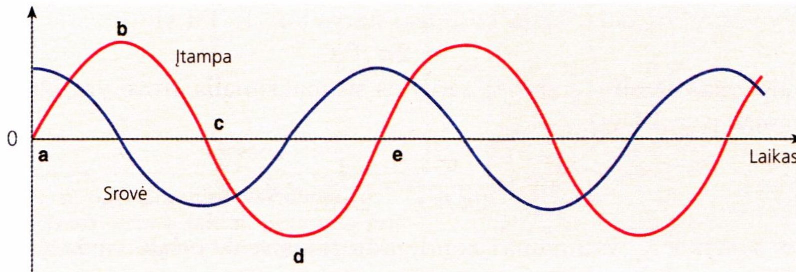
Tai reiškia, kad srovė bet kuriuo metu yra proporcinga įtampos kitimo greičiui.

Jei potencialų skirtumas to kondensatoriaus gnybtuose kinta sinuso dėsniu, t. y., ji yra standartinė kintamoji įtampa, tai

$$V = V_0 \sin 2\ \pi f t$$

Taigi $$I = C\frac{dV}{dt} = C\frac{d}{dt}(V_0 \sin 2\pi f t) = 2\pi f C V_0 \cos 2\pi f t$$

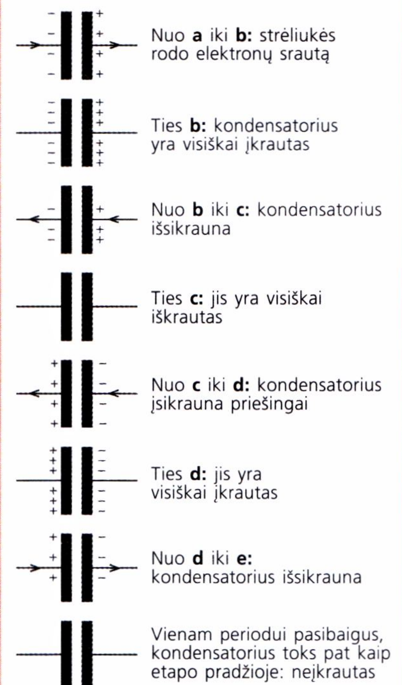
Tai yra, jei potencialų skirtumas yra sinusinė banga, tai srovė bus kosinusinė banga, kaip vaizduojama 13.14 pav.



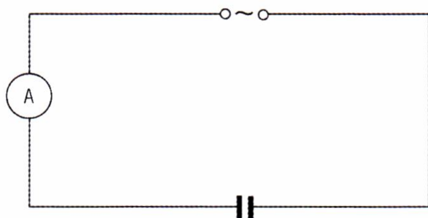
13.14 pav. **Grafikai atspindi, kaip srovė ir įtampa kondensatoriuje kinta laike. Atkreipkite dėmesį, kad srovė „pralenkia" įtampą 90°**

Pirmas dalykas, vertas pažymėti, yra tas, kad įtampos ir srovės fazės nevienodos – jos nekinta aukštyn ir žemyn kartu. Atidžiai įsižiūrėkime, kas vyksta, besikeičiant prijungtai įtampai, 13.14 pav. parodytais etapais.

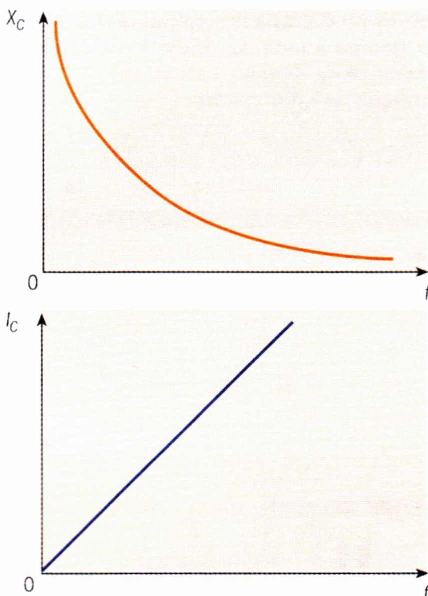
- *Nuo **a** iki **b*** Pradžioje, kai laikas $t = 0$, įtampa lygi nuliui, bet tą pačią akimirką srovė yra maksimalios vertės. Kondensatoriaus įtampai didėjant, srovė mažėja iki pasiekia nulį, kai įtampa yra maksimali. Šitame taške kondensatorius yra visiškai įkrautas.
- *Nuo **b** iki **c*** Įtampa dabar mažėja, o srovė didėja priešinga kryptimi, – tai reiškia, kad krūvis teka priešinga kryptimi, iškraudamas kondensatorių. Tuo laiku, kai įtampa pasiekia nulį, srovė yra labiausiai „neigiama". Kondensatorius dabar yra visiškai išsikrovęs.
- *Nuo **c** iki **d*** Krūvis tebeteka ta pačia kryptimi, besikeičiant įtampos krypčiai, ir palaipsniui pakinta iki didžiausios neigiamos vertės. Šiame taške srovė vėl lygi nuliui, o kondensatorius vėl yra visiškai įkrautas, tačiau krūvis elektroduose dabar yra priešingų ženklų.
- *Nuo d iki e* Įtampai grįžtant prie nulio, kondensatorius išsikrauna, krūviui tekant vėl priešinga kryptimi, kol taške **e** kondensatorius jau neįkrautas.



Vėl pažvelkite į 13.14 pav.: srovė visą laiką ketvirčiu periodo pralenkia įtampą. (Atsiminkite: įvykiai grafike kairiau atsitinka prieš įvykius dešiniau.) Periodo ketvirtis ekvivalentus 90°, taigi sakome, kad srovė **pralenkia** įtampą 90°. Srovė maksimali, kai potencialų skirtumas lygus nuliui. Potencialų skirtumui didėjant, srovė mažėja.



13.15a) pav. **Grandinėje parodytas keičiamo dažnio šaltinis, prijungtas prie kondensatoriaus**



13.15b) pav. **Grafikai atspindi, kaip kondensatoriaus reaktyvioji varža ir srovė grandinėje kinta, keičiantis dažniui**

?

D Apskaičiuokite 1 μF kondensatoriaus reaktyviąją varžą, esant **a)** 1 kHz, **b)** 100 kHz ir **c)** 1 MHz.

Nuosekliose grandinėse įtampos ir srovės santykis nusako mums svarbų parametrą – laidininko varžą. Įtampos ir srovės santykis pravartus ir grandinėse su kondensatoriais, vadinamosiose **talpinėse grandinėse,** nors čia ir šiek tiek sudėtingiau.

Paprastas įtampos santykis su srove nebus labai prasmingas: kai įtampa lygi nuliui, srovė yra maksimali, o gaunamas santykis – nulis, ir kai įtampa maksimali, srovė lygi nuliui, gaunamas santykis yra begalybė.

Tačiau maksimalios įtampos santykis su maksimalia srove yra naudingas. Tegul maksimali įtampos vertė yra V_0. Maksimali srovės vertė bus tada, kada kosinuso narys bus 1. Tai yra,

$$I_{max} = 2\pi fV_0C$$

Taigi maksimalios įtampos santykis su maksimalia srove yra gaunamas pagal lygtį

$$\frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{V_0}{2\pi fV_0C} = \frac{1}{2\pi fC} = X_C$$

Šis santykis X_C vadinamas kondensatoriaus **reaktyviąja varža** (reaktansu). Kadangi ši varža yra įtampos santykis su srove, ji matuojama voltais amperui, $V \cdot A^{-1}$, arba omais, Ω.

Ši lygtis ir 13.15a) pav. rodo, kad reaktyvioji varža mažėja, didėjant dažniui. Arba, kitaip sakant, dažniui didėjant, srovė grandinėje didės, kaip matyti 13.15b) pav.

Atrodo, tarsi kondensatorius būtų „laidesnis“, esant dideliam dažniui. Tačiau įsidėmėkite – krūvis nepersikelia tiesiogiai iš vieno elektrodo į kitą.

Induktoriai

Krūvis teka induktoriumi, bet tolygiai besikeičianti srovė kuria tolygiai besikeičiantį magnetinį lauką. Šis kintantis magnetinis laukas indukuoja elektrovarą, kuri priešinasi srovei. Iš lygties, apibrėžiančios **induktyvumą** (žr. 273 p.), nustatome sąryšį tarp srovės ir įtampos:

$$V = L\, dI/dt,$$

kur V yra įtampa induktoriaus gnybtuose, o I yra srovė induktoriuje.

Jei srovė yra sinusinė, t. y.

$$I = I_0 \sin 2\pi ft$$

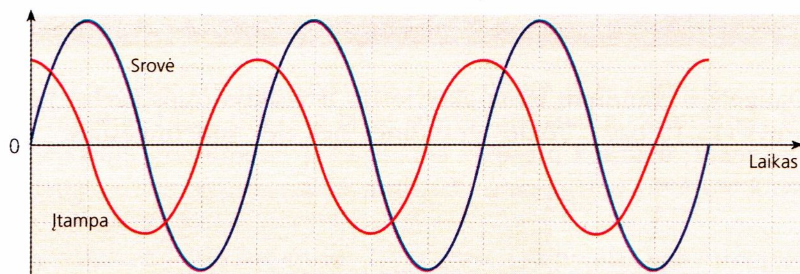
tai
$$V = L\frac{d}{dt}(I_0 \sin 2\pi ft) = 2\pi fLI_0 \cos 2\pi ft$$

Kaip ir kondensatoriui, srovė ir įtampa yra ne tos pačios fazės. Įtampos ir srovės fazės vėl skiriasi ketvirčiu periodo, arba 90°. Šį kartą, kaip atvaizduota 13.16 pav., įtampa pralenkia srovę 90°.

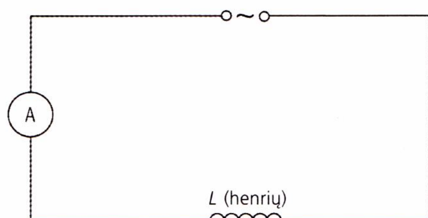
Galime apibrėžti indukcinę **reaktyviąją varžą** (reaktansą) X_L tuo pačiu būdu, kaip ir kondensatoriui:

$$X_L = \frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{2\pi fLI_0}{I_0} = \mathbf{2\pi fL}$$

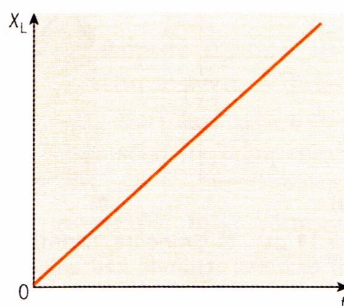
Indukcinė reaktyvioji varža (reaktansas) yra proporcinga dažniui. Dažniui didėjant, srovė induktoriuje mažės (žr. 13.17 pav.).

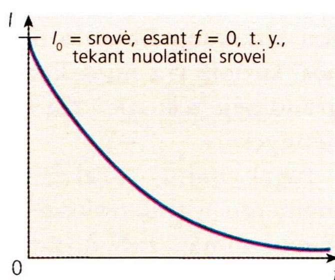


13.16 pav. **Grafikai atspindi, kaip srovė ir įtampa induktoriuje kinta laike. Šį kartą atkreipkite dėmesį, kad įtampa aplenkia srovę 90°**



13.17a) pav. **Grandinė vaizduoja keičiamo dažnio šaltinį, prijungtą prie induktoriaus, kurio induktyvumas *L***





13.17b) pav. **Grafikai atspindi, kaip induktoriaus reaktyvioji varža ir srovė grandinėje kinta, kintant dažniui. Maksimali srovė lygi prijungtai įtampai, padalytai iš ritės varžos**

Lygiai 90° fazių skirtumai sutinkami tik vien talpinėse grandinėse ir vien indukcinėse grandinėse. Realiai beveik neįmanoma turėti „vien indukcinę“ grandinę, kadangi laidas ritėje visada turi šiokią tokią varžą.

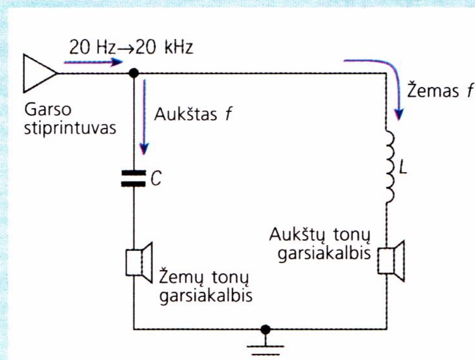
E Apskaičiuokite 1 μH induktoriaus reaktyviąją varžą, esant **a)** 1 kHz, **b)** 100 kHz ir **c)** 1 MHz.

■ Žr. 6 ir 7 klausimus.

FILTRŲ GRANDINĖS

GARSO SISTEMOS SKIRTOS atkurti garso signalams nuo 20 Hz iki 20 kHz dažnio. Paprasčiausiose sistemose panaudojami du garsiakalbiai – vienas yra žemų tonų, skirtas atkurti žemojo dažnio, arba **bosų**, garsus, o antrasis aukštų tonų, atkuriantis aukštesnio dažnio, arba **diskantų**, garsus. Išvado signalas iš garso stiprintuvo turi visą dažnių spektrą. „Teisingiems“ dažniams nukreipti į atitinkamą garsiakalbį naudojami filtrai. 13.18 pav. atvaizduota paprasta filtro grandinė, vadinama **sanklota,** kurioje naudojami kondensatoriai ir **induktoriai.**

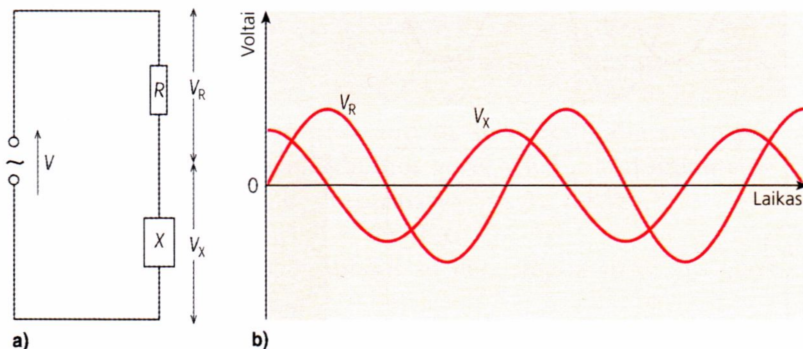
Žemo dažnio signalai pasirenka mažesnės reaktyviosios varžos kelią pro induktorių į žemų tonų garsiakalbį, o aukštesnio dažnio signalams lengviau yra praeiti pro kondensatorių.



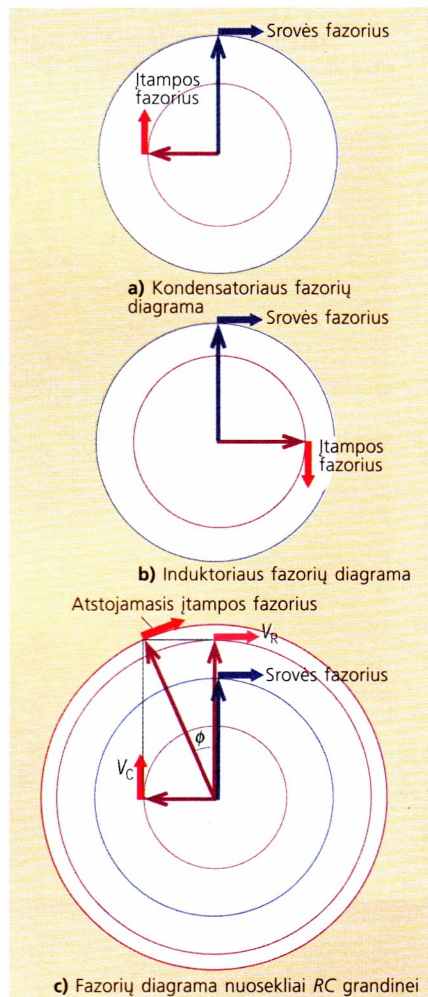
13.18 pav. **Sanklotos grandinė**

7 IMPEDANSAS

Daugelyje grandinių būna aktyviosios ir reaktyviosios varžos junginys (13.19 pav.). Tokios grandinės šiek tiek sudėtingesnės.



13.19 pav. a) **Grandinė, turinti aktyviosios ir reaktyviosios varžos junginį.** b) **Grafikas atspindi, kad aukščiausios įtampos pro kiekvieną elementą nėra tos pačios fazės**



13.20 pav. **Fazoriai yra besisukantys vektoriai. Jie labai pravartūs, analizuojant kintamosios srovės grandines, turinčias kondensatorių ir induktorių.**

Fazorius diagramoje sukasi pagal laikrodžio rodyklę. Jis sukasi šaltinio dažniu. Atkreipkite dėmesį, kad kondensatoriaus srovės fazorius 90° aplenkia įtampos fazorių. Induktoriaus įtampa aplenkia srovę 90°.

c) atstojamoji įtampa atsilieka nuo srovės kampu ϕ

Kai kintamoji fiksuoto dažnio įtampa prijungiama prie grandinės, kurioje yra nuosekliai sujungta aktyvioji ir reaktyvioji varža, grandinėje teka vienoda srovė. Tačiau įtampų sąryšis yra kiek sudėtingesnis.

Pagal energijos tvermės dėsnį šaltinio įtampa bet kuriuo laiko momentu lygi aktyviosios ir reaktyviosios varžų įtampų tuo momentu sumai. Tačiau didžiausios įtampos kiekviename elemente fazės nesutampa, taigi jų suma negali būti lygi didžiausiai šaltinio įtampai.

Aktyviosios ir reaktyviosios varžos junginys vadinamas **impedansu;** jis matuojamas omais. Impedansas gali būti apskaičiuotas nagrinėjant skirtingų elementų įtampas kaip vektorinius dydžius. Vektorines diagramas naudojame sudėti dviem jėgoms, veikiančioms skirtingomis kryptimis, kaip pavaizduota 13.20a) pav. Įtampos 13.19 pav. gali būti skirtingo didumo, tačiau skiriasi ir jų fazė. (Reaktyviosios įtampos fazę ir didumą vaizduojantis fazorius visada savo faze 90° skiriasi nuo varžinės įtampos fazoriaus.) 13.20b) pav. pateikta fazorių diagrama. Įtampų fazoriai gali būti sudedami panašiai kaip vektoriai.

Impedansą Z (omais) apibrėžia lygtis

$$Z = \frac{V}{I}$$

Atstojamoji įtampa $\quad V = \sqrt{V_R^2 + V_X^2}$,

kur V_R yra potencialų skirtumas rezistoriaus gnybtuose, o V_X yra potencialų skirtumas bet kurios reaktyviosios varžos, talpinės ar indukcinės, gnybtuose.

$$V = \frac{\sqrt{V_R^2 + V_X^2}}{I}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{V_R}{I}\right)^2 + \left(\frac{V_X}{I}\right)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

?

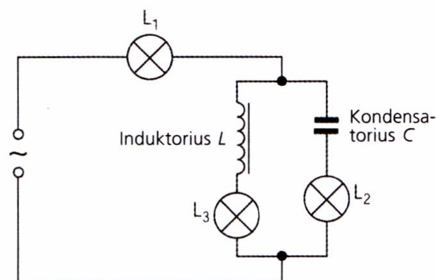
F a) Apskaičiuokite 100 omų rezistoriaus, nuosekliai sujungto su 10 μF kondensatoriumi, impedansą, esant **(i)** 1 kHz, **(ii)** 1 MHz.

b) Pakartokite skaičiavimus, pakeitę kondensatorių 1 mH induktoriumi.

8 *LC* GRANDINĖS

LC grandinėse yra induktyvumo (*L*) ir talpos (*C*) junginiai.

Grandinė 13.21 pav. yra labai svarbi apskritai elektronikoje, ir ypač radijo grandinėse. Ji vadinama **virpesių kontūru.** Vienas iš jo taikymų yra išskirti radijo stotis (daugiau sužinosite 2-oje knygos dalyje, 21 sk.).

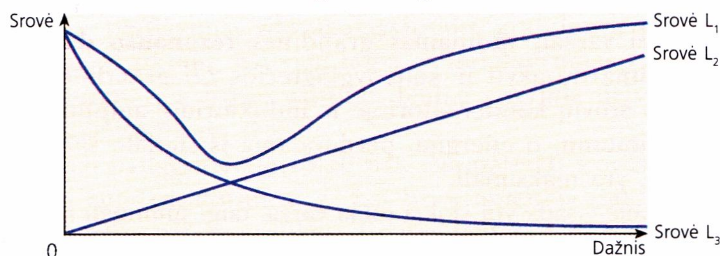


13.21 pav. Lygiagrečiai sujungti induktorius su kondensatoriumi, prijungti prie keičiamo dažnio šaltinio

Aukštėjant šaltinio dažniui 13.21 pav., lemputės L_1 skaistis palaipsniui mažėja, iki pasiekia minimalų. Vėliau didinant dažnį skaistis didėja.

Kitų dviejų lempučių skaistis irgi kinta. Lemputė L_2, kuri sujungta nuosekliai su kondensatoriumi, iš pradžių nešvyti, o didėjant dažniui palaipsniui jos skaistis didėja. L_3, kuri sujungta nuosekliai su induktoriumi, iš pradžių šviečia skaisčiai ir palaipsniui blanksta. Tai grafiškai pavaizduota 13.22 pav.

Kondensatorius ir induktorius yra lygiagretūs, taigi įtampa abiejuose elementuose yra visada tokia pati. Kondensatoriaus įtampa atsilieka nuo srovės 90°, bet ji tiek pat aplenkia srovę induktoriuje. Tai reiškia, kad srovės induktoriuje fazė 180° skiriasi nuo srovės kondensatoriaus grandinėje.



13.22 pav. Grafikai, atspindintys, kaip kinta srovės, didėjant dažniui 13.21 pav. grandinėje

Kintant šaltinio dažniui, bus pasiektas toks dažnis, kai kondensatoriaus ir induktoriaus reaktyviosios varžos bus tokios pat:

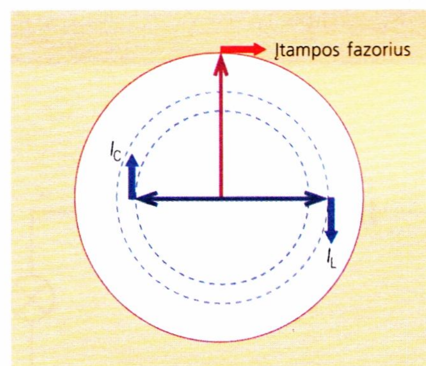
$$X_L = X_C$$

Tai yra, $$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

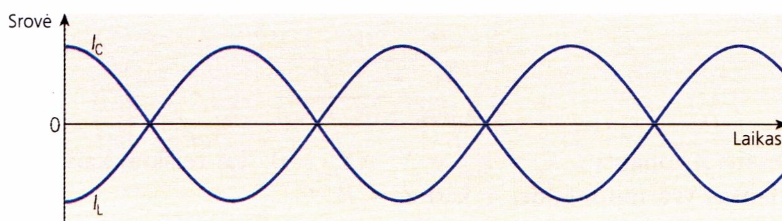
Galime pertvarkyti taip: $$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

Taigi gauname: $$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Esant šiam dažniui, iš šaltinio imama srovė yra minimali, nors kondensatoriuje ir induktoriuje teka gana didelės srovės. Srovės kiekvienoje šakoje yra vienodos, bet jos yra priešingų fazių (fazės skiriasi 180°). Jos susiprastina, taigi tikroji srovė, imama iš šaltinio, yra minimali, – pažvelkite į 13.24 pav. kreives, – ir taip pat paaiškėja, kodėl lemputė L_1 13.21 pav. švyti minimaliai.

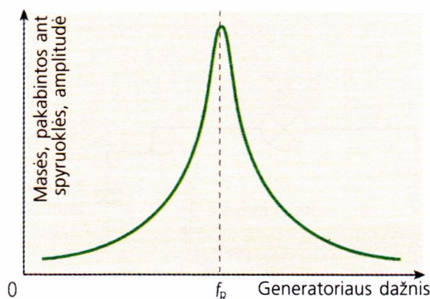


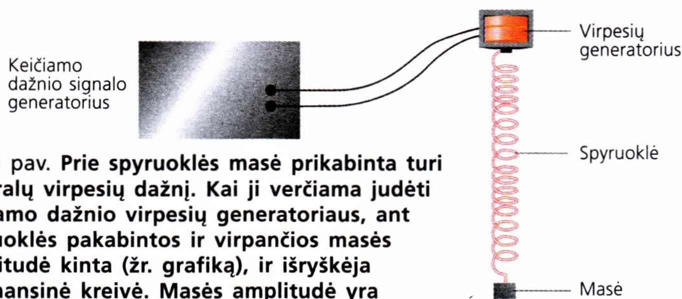
13.23 pav. Fazoriaus diagrama lygiagrečiai *LC* grandinei. Įtampa vienoda tiek *L*, tiek ir *C*. Srovių *L* ir *C* fazės skiriasi 180°. Kas atsitinka, kai srovės yra vienodo didumo?



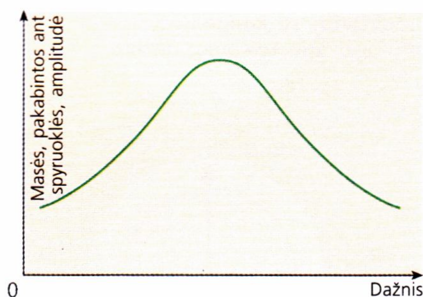
13.24 pav. Srovės I_C kondensatoriuje ir srovės I_L induktoriuje grafikai, kai reaktyviosios varžos X_C ir X_L yra vienodos. Srovės yra vienodo didumo, bet jų fazės skiriasi 180°

■ Žr. 8 klausimą.





13.25 pav. **Prie spyruoklės masė prikabinta turi natūralų virpesių dažnį. Kai ji verčiama judėti keičiamo dažnio virpesių generatoriaus, ant spyruoklės pakabintos ir virpančios masės amplitudė kinta (žr. grafiką), ir išryškėja rezonansinė kreivė. Masės amplitudė yra maksimali, kai priverstinis dažnis sutampa su savuoju sistemos dažniu**



13.26 pav. **Jei masės ant spyruoklės osciliatorius 13.25 pav. yra slopinamas, tai rezonanso kreivė palėkštėja. Varžą įjungus į lygiagrečią *LC* grandinę, ji taip pat paveiks rezonansinę kreivę**

?

G Apskaičiuokite lygiagrečios *LC* grandinės, sudarytos iš 1 mH induktoriaus ir 500 pF kondensatoriaus, rezonansinį dažnį (1 pF = 10^{-12} F.)

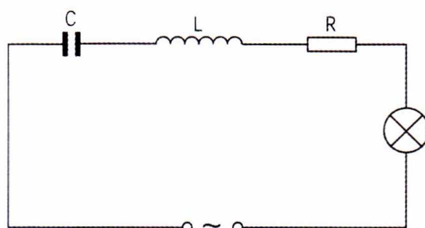
Šios grandinės veikimą galima palyginti su mechaninių virpesių sistemų veikimu. 13.25 pav. atvaizduota masė ir spyruoklė, kurios verčiamos virpėti virpesių generatoriaus. Grafikas vaizduoja, kaip kinta virpančios masės amplitudė keičiant virpesių generatoriaus dažnį.

Būdinga smailė grafike atitinka rezonansą. Kai virpesių generatoriaus dažnis yra toks pats, kaip ir savasis masės ant spyruoklės dažnis, energija, perduodama iš generatoriaus masei, yra maksimali (žr. 6 skyrių).

Dažnis, ties kuriuo talpinė reaktyvioji varža lygi induktyviajai reaktyvinei varžai, vadinamas grandinės **rezonanso dažniu.** Šį dažnį galima nusakyti ir kaip lygiagrečios *LC* grandinės **savąjį dažnį,** kai srovių kondensatoriuje ir induktoriuje amplitudės yra ties maksimumu, o energija, perduodama iš signalo šaltinio *LC* grandinei, yra maksimali.

Grandinėje visada yra šiokia tokia varža, taigi minimali iš šaltinio imama srovė, esant rezonansui, nelygi nuliui. Varža daro dar ir kitą poveikį – rezonansas palėkštėja arba yra „slopinamas" (13.26 pav.).

9 NUOSEKLIAI SUJUNGTOS *LCR* GRANDINĖS IMPEDANSAS



13.27 pav. **Grandinė su nuosekliai sujungtais kondensatoriumi, induktoriumi ir varža, prijungta prie keičiamo dažnio šaltinio**

Grandinėje, pavaizduotoje 13.27 pav., didinant dažnį, lemputės skaistis didėja iki maksimalaus, o vėliau vėl mažėja. Šios grandinės analizei reikia žinoti jos impedansą.

Kaip ir visose nuosekliose grandinėse, srovė visuose grandinės taškuose yra vienoda. Įtampa induktoriaus gnybtuose pralenkia srovę 90°, o įtampa kondensatoriaus gnybtuose atsilieka nuo srovės 90°. Rezistoriaus įtampos fazė sutaps su srovės faze. Fazorių diagramos 13.28 pav. atspindi šias įtampas ir tai, kaip galime rasti jų atstojamąją.

Atstojamoji įtampa

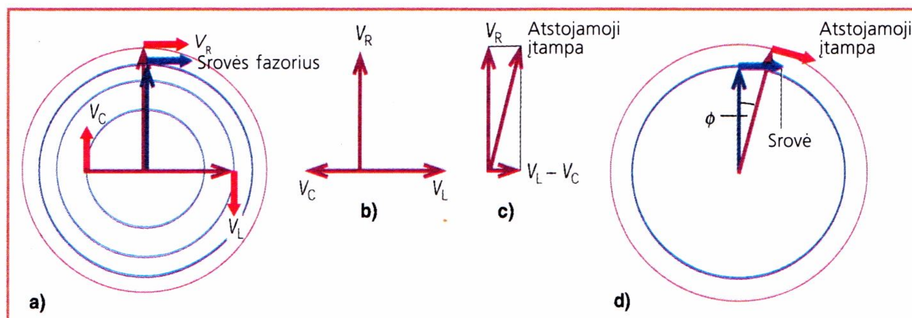
$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

Impedansas gaunamas iš V/I, ir

$$Z = \sqrt{\frac{V_R^2}{I^2} + \frac{(V_L - V_C)^2}{I^2}}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)}$$

Esant rezonansui, $X_L = X_C$, ir $X_L - X_C = 0$. Tai reiškia, kad impedansas yra minimalus, ir kad $Z = R$.



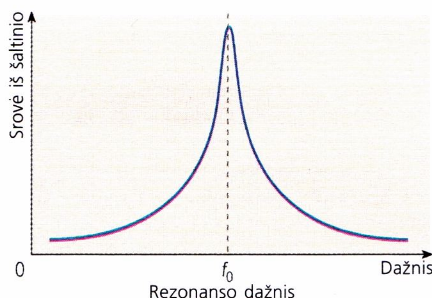
13.28 pav. **Fazorių diagramos nuosekliai *RCL* grandinei.** a) **Visi įtampos fazoriai vienas kito atžvilgiu.** b) **Įtampos fazoriai atskirai.** c) **Įtampos fazorių atstojamoji.** d) **Įtampos atstojamoji srovės atžvilgiu. Srovė atsilieka nuo įtampos kampu ϕ**

Šios grandinės rezonansinė kreivė pavaizduota 13.29 pav. Esant rezonanso dažniui, srovė yra maksimali.

Kadangi esant rezonansui $X_L = X_C$, rezonanso dažnis gaunamas pagal tą pačią lygtį, kurią buvome išvedę lygiagrečiai *LC* grandinei:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

13.29 pav. **Rezonansinė kreivė nuosekliai 13.27 pav. *RCL* grandinei. Nuoseklioje grandinėje esant rezonansui srovė iš šaltinio maksimali**



10 GALIA REAKTYVIOSIOSE GRANDINĖSE

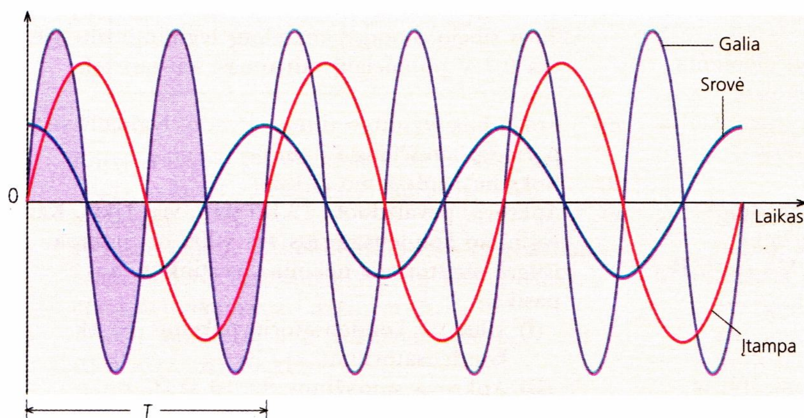
Energijos perdavimas vien reaktyviosiose grandinėse gali atrodyti keistai. Iš tikrųjų, kai vien talpa ar induktyvumas yra prijungti prie kintamosios srovės šaltinio, realiai energija neperduodama per sveikąjį periodų skaičių.

Atidžiai panagrinėkite 13.30 pav. Čia pateikti srovės ir įtampos grafikai kondensatoriui, t. y., kai srovė aplenkia įtampą 90°. Pavaizduotas ir galios grafikas. Jis išvedamas iš kitų dviejų, pasinaudojant lygtimi

Galia = srovė × įtampa

atitinkamoms *I* ir *V* vertėms per visą periodą ar panašiai. Kaip galime pastebėti iš 13.30 pav., energija neperduodama per sveikąjį periodų skaičių. Tai, kas suteikiama kondensatoriams per pirmąjį periodo ketvirtį, kito metu yra grąžinama.

Iš tikrųjų taip nebūna. Yra beveik neįmanoma turėti grandinę be jokios aktyviosios varžos, o srovė, atlikdama darbą aktyviajai varžai įveikti, sukuria šilumą. Nedidelė varža, esanti kondensatoriaus jungiamuosiuose laiduose, sukelia šiokius tokius energijos nuostolius. Laidas induktoriaus ritėse irgi turi varžą. Tikrosios apkrovos turi pilną varžą – impedansą, ir iš šaltinio apkrovai perduodama energija.



13.30 pav. **Energijos sklaida vien reaktyviojoje varžoje, – šiuo atveju kondensatoriuje. Įtampos ir srovės fazės skiriasi 90°. Gaunama galia apsisuka uždaru ciklu du kartus per kiekvieną prijungtosios srovės periodą. Teigiamieji galios pusperiodžiai atitinka energiją, tiekiamą iš šaltinio kondensatoriui. Neigiamųjų pusperiodžių metu energija, sukaupta kondensatoriuje, sugrąžinama šaltiniui. Per sveikąjį ciklų skaičių energija neperduodama (lygi nuliui)!**

■ Žr. 9 klausimą.

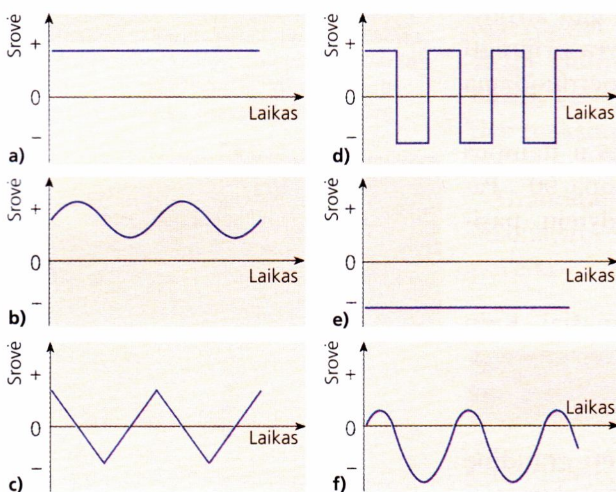
SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių, turėtumėte gebėti:

- Apsakyti kintamų įtampų ir srovių savybes: didžiausią įtampą, dažnį ir periodą.
- Panaudoti sąryšius tarp efektinių ir didžiausių įtampų bei srovių.
- Nurodyti transformatorių naudojimo Nacionaliniame tinkle ir elektros energijos perdavimo aukštų įtampų pavidalu privalumus.
- Apsakyti, kaip diodai naudojami kintamųjų srovių lyginimui.
- Apibūdinti rezistorių, kondensatorių ir induktorių veikimą kintamosios srovės grandinėse.
- Panaudoti lygtis $X_C = 1/2\ \pi f C$ ir $X_L = 2\pi f L$ kondensatorių ir induktorių reaktanso skaičiavimuose.
- Nusakyti impedansą kaip aktyviosios ir reaktyviosios varžos junginį ir apskaičiuoti *LR*, *CR* ir *LCR* grandinių impedansą.
- Apskaičiuoti lygiagrečios *LC* grandinės rezonanso dažnį.
- Paaiškinti, kodėl vien reaktyviosios varžos nesklaido energijos.

KLAUSIMAI

1 Kurios iš bangos formų 13.K1 pav. nuo a) iki f) yra kintamosios srovės, o kurios – nuolatinės srovės?



13.K1 pav.

2 Kintamojo šaltinio išvado signalo išraiška yra tokia: $v = 20 \sin 628t$. Kokie yra

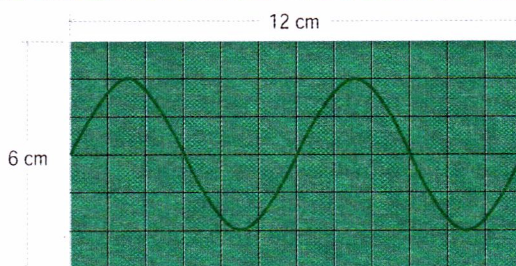
a) maksimali šaltinio įtampa?
b) įtampos efektinė vertė?
c) šaltinio dažnis?

3 Elektrinis židinys turi varžinį kaitinimo elementą, kurio parametrai 230 V ir 1 kW. Apskaičiuokite elemento varžą ir didžiausią juo tekančią srovę, kai jis prijungtas prie tinklo.

4 13.K4 pav. atvaizduotas kintamosios įtampos pėdsakas osciloskope. Skleistinė nustatyta ties 0,1 ms · cm^{-1}, o jautrumas Y kryptimi – 2 V · cm^{-1}. Iš pėdsako apskaičiuokite:

a) didžiausią įtampą,
b) dažnį.

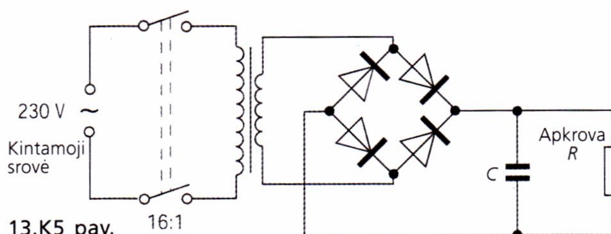
Pėdsakas iš tikrųjų yra potencialų skirtumas 100 Ω rezistoriaus gnybtuose.



13.K4 pav.

c) Apskaičiuokite efektinę srovę pro rezistorių.

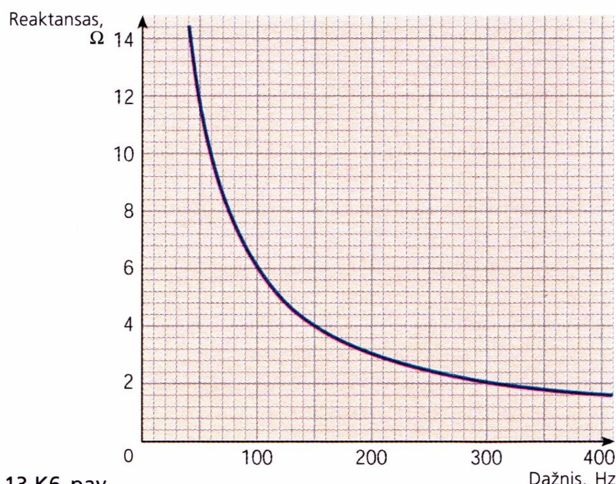
5 13.K5 pav. atvaizduota paprasto maitinimo šaltinio grandinė. Vijų skaičiaus santykis transformatoriuje yra 16:1.



13.K5 pav.

a) Kokia bus efektinė įtampa antrinėje transformatoriaus ritėje?
b) Kokia bus aukščiausia įtampa antrinėje ritėje? Tarp silicio diodų, panaudotų lyginimo tiltelyje, yra 0,7 V potencialų skirtumas, kai jais teka srovė.
c) Kokia bus lyginimo tiltelio išvado, lyginant visą periodą, aukščiausia įtampa?
d) Koks bus pulsavimo dažnis?
e) Apkrova, pavaizduota 13.K5 pav., yra 1 kΩ. Kai lyginimo kondensatorius yra 1000 μF, įtampa išilgai rezistoriaus nekinta. Įvertinkite, kas pasikeis:
   (i) 1000 μF kondensatorių pakeitus 10 μF kondensatoriumi,
   (ii) Apkrovą sumažinus iki 10 Ω (C = 1000 μF).

6 13.K6 pav. atvaizduota, kaip kondensatoriaus reaktyvioji varža keičiasi, kintant dažniui.



13.K6 pav.

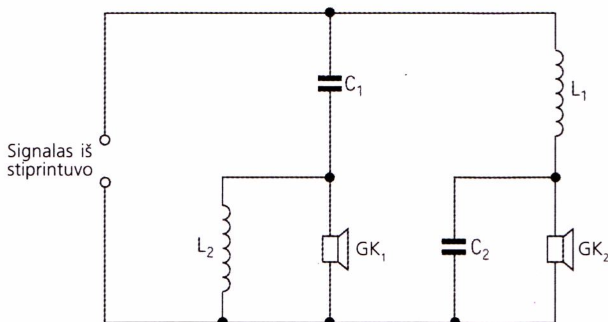
a) Pasinaudokite grafiko duomenimis ir apskaičiuokite kondensatoriaus talpą.

b) Nukopijuokite brėžinį ir naudodamiesi tomis pačiomis koordinatėmis, nubrėžkite reaktyviosios varžos priklausomybės nuo dažnio grafiką induktoriui, kurio reaktyvioji varža esant 150 Hz tokia pati, kaip kondensatoriaus.

c) Koks yra induktoriaus iš b) dalies induktyvumas?

d) Jei šis induktorius būtų sujungtas nuosekliai su 10 Ω rezistoriumi, kokį impedansą turėtų šis junginys esant **(i)** 150 Hz, **(ii)** 300 Hz?

7 13.K7 pav. atvaizduota „sanklotos“ mazgo, naudojamo garsiakalbių sistemoje, grandinė. Sistemoje yra du garsiakalbiai: žemųjų dažnių, arba bosų, garsiakalbis, ir aukštųjų dažnių, arba diskantų, garsiakalbis. Sanklota sudaryta taip, kad signalai, kurių dažnis žemesnis nei 800 Hz, nukreipiami į bosus, o tie, kurių dažnis už 800 Hz aukštesnis, – į diskantus.



13.K7 pav.

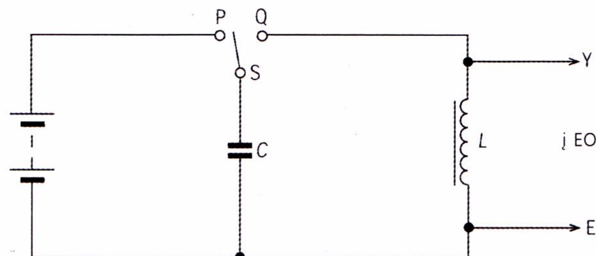
a) Kuris iš dviejų garsiakalbių, GK_1 ir GK_2, yra bosas, o kuris – diskantas? Pagrįskite savo atsakymą.

b) Induktoriaus L_1 ir kondensatoriaus C_1 reaktansas esant 800 Hz turi būti maždaug 100 Ω. Apskaičiuokite tinkamas L_1 ir C_1 vertes.

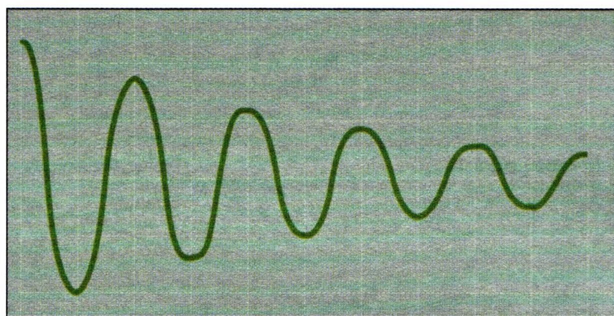
c) Apskaičiuokite L_1 ir C_1 reaktyviąją varžą, esant **(i)** 5 kHz, **(ii)** 10 kHz.

d) Induktorius L_2 ir kondensatorius C_2 pagerina sistemos darbą. Pasiūlykite tinkamas jų reaktyviosios varžos vertes, kai dažnis 800 Hz, ir įvertinkite tinkamas L_2 ir C_2 vertes.

8 Kondensatorius ir induktorius prijungti prie baterijos, kaip pavaizduota 13.K8a) pav.



13.K8a) pav.



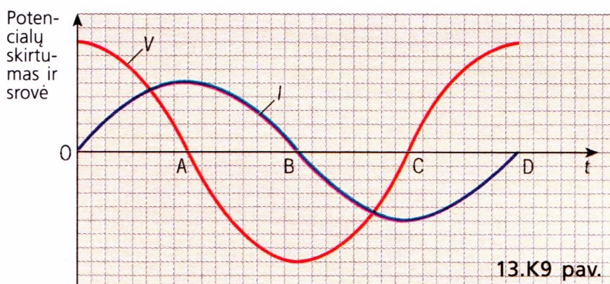
13.K8b) pav.

Kai jungiklis perjungiamas nuo P prie Q, osciloskopo ekrane stebimi virpesiai, pavaizduoti 13.K8b) pav.

a) Osciloskopo laiko skleistinė yra nustatyta, kad 200 ms atitiktų vieną padalą. Apskaičiuokite virpesių dažnį.

b) C vertė yra 470 μF. Apskaičiuokite induktyvumo vertę.

9 13.K9 pav. atvaizduota, kaip, laikui bėgant, keičiasi prie ritės, pagamintos iš storo varinio laido, galų prijungtas kintamas potencialų skirtumas ir pro tą ritę tekanti srovė I.



13.K9 pav.

a) Kodėl prijungtasis potencialų skirtumas lygus nuliui, kai srovė I yra maksimali?

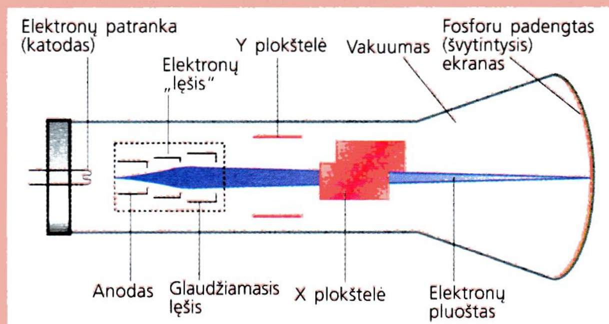
b) Kuriais laiko intervalais iš OA, AB, BC ir CD energijos šaltinis **(i)** teiktų energiją, **(ii)** gautų energiją?
Kaip tai nusprendėte kiekvienu atveju?
Kai energijos šaltinis gauna energiją, iš kur ta energija atsiranda?

Užduotis

OSCILOSKOPAS

Osciloskopas yra didelės varžos kintamosios srovės ir nuolatinės srovės voltmetras – t. y. chronometravimo prietaisas, galintis matuoti laiką mikrosekundžių dalių tikslumu. Jis gali optiškai atvaizduoti elektrinius svyravimus, kad būtų galima tyrinėti tų svyravimų charakteristikas.

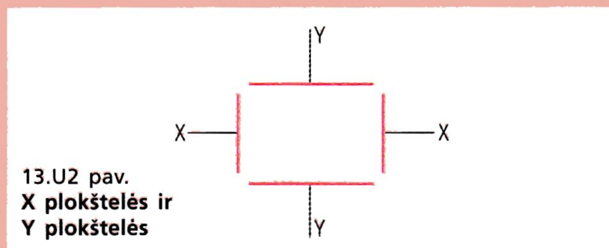
Elektroninis osciloskopas (EO) veikia kaip elektroninis vamzdis. Vamzdyje elektronų pluoštas, skleidžiamas elektronų patrankos, greitinamas ekrano link. Ekranas padengtas fosforu. Kai elektronai susiduria su fosforo atomais, jų kinetinė energija yra perduodama fosforo atomams, ir ta energija išspinduliuojama šviesos pavidalu.



13.U1 pav. **Elektroninis vamzdis**

Elektronams sklindant pluošto pavidalu iš elektronų patrankos, jų pagreitis gali būti keičiamas. Tuo būdu ir pluošto skaistis ekrane gali būti keičiamas. Pluoštas gali būti ir suglaudžiamas, kai jis praeina pro elektrodą.

Prieš krisdamas į ekraną, pluoštas praeina pro du lygiagrečių plokštelių komplektus. Tos plokštelės yra statmenos ir vadinamos X plokštelėmis bei Y plokštelėmis.



13.U2 pav. **X plokštelės ir Y plokštelės**

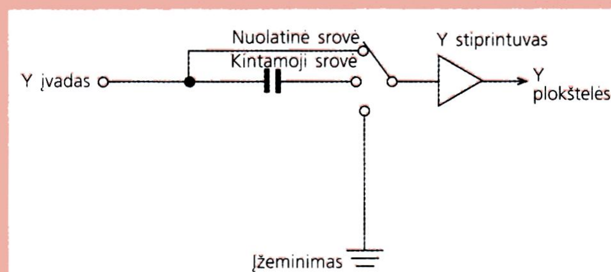
Tiksli sinchronizacijos grandinė, vadinama **laiko skleistine**, prijungta prie X plokštelių. Signalas iš skleistinės valdo elektronų pluošto judėjimą į šonus, t. y. X kryptimi. Skleistinės signalas tempia elektronų pluoštą link dešiniosios X plokštelės taip, kad pluoštas juda pastoviu greičiu išilgai ekrano. Skleistinės valdymas leidžia kaitalioti greitį, kuriuo spindulys slenka ekranu.

1 Tipiškas osciloskopo ekranas yra 10 cm pločio, o skleistinė gali būti keičiama nuo 0,1 s · cm^{-1} iki 0,5 $\mu s \cdot cm^{-1}$. Kiek laiko kiekvienu atveju užtruks pluoštas, praeidamas ekraną?

Signalas, kurį tirsime, prijungtas prie Y plokštelių. Bet koks signalas, prijungtas prie Y plokštelių per stiprintuvą, verčia elektronų pluoštą nukrypti statmenai. Stiprintuvu galima išmatuoti platų įtampų intervalą. Statmenasis nuokrypis visada proporcingas signalo įtampai. Stiprintuvo jautris valdomas Y stiprinimo perjungikliu ir būtų matuojamas V · cm^{-1} arba mV · cm^{-1}.

Elektroniniu osciloskopu galima matuoti arba nuolatines, arba kintamąsias įtampas. Atitinkamai nustatomas kintamosios srovės / nuolatinės srovės perjungiklis. Nuolatinė įtampa prijungiama tiesiog prie Y stiprintuvo. Kintamoji įtampa jungiama per kondensatorių.

Dauguma elektroninių osciloskopų dar turi ir trečią jungiklio padėtį – įvadui įžeminti. Tai labai praverčia nustatant, kur yra pradinis pėdsakas.



13.U3 pav. **Kintamosios srovės/nuolatinės srovės schema**

Nuolatinė įtampa (skleistinės generatorius yra išjungtas) verčia pėdsaką judėti aukštyn arba žemyn, priklausomai nuo jo poliškumo.

2 Nustačius Y stiprinimą į 2 V · m^{-1} padėtį, kokia nuolatinė įtampa pėdsaką nukreiptų šitaip:

a) 2 cm aukštyn,
b) 3 cm žemyn,
c) 0,5 cm žemyn,
d) 3,5 cm aukštyn?

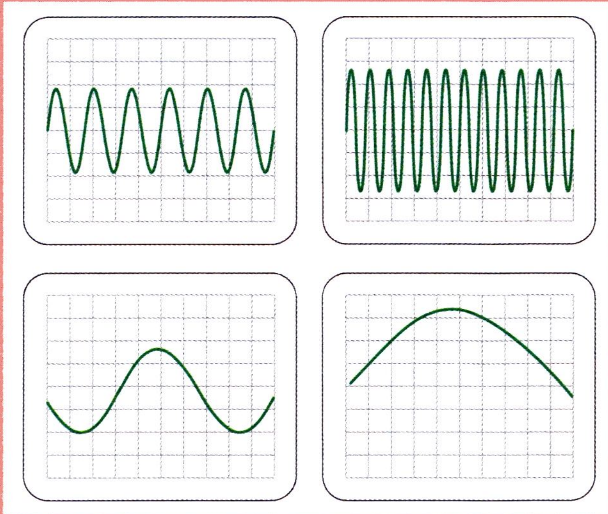
Kai prie įvado prijungiama kintamoji įtampa, pėdsakas ekrane teikia pakankamai informacijos, kad būtų išmatuota signalo įtampa ir dažnis. Dažnai lengviau išmatuoti įtampą „nuo smailės iki smailės", t. y. įtampą nuo signalo viršaus iki apačios. Tada didžiausia įtampa yra pusė vertės „nuo smailės iki smailės".

Naudojant elektroninį osciloskopą, dažnį galima rasti matuojant signalo periodą; tada tas dažnis „suskaičiuojamas", naudojantis lygtimi

$$\text{dažnis (Hz)} = \frac{1}{\text{periodas (s)}}$$

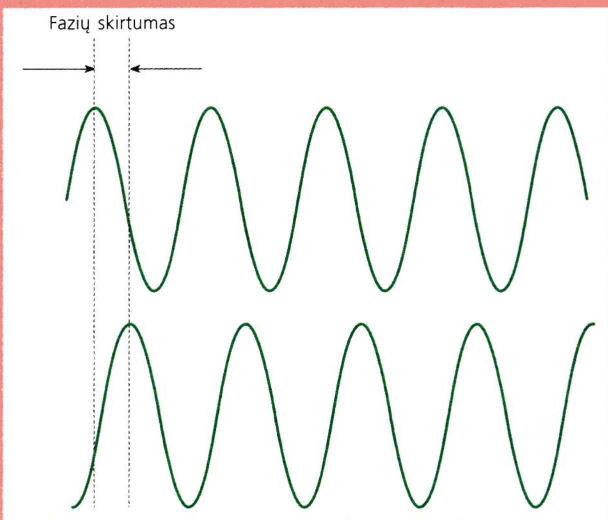
Elektroninis osciloskopas turėtų būti su trigerio valdymo rankenėle. Ji gali būti fiksuotų padėčių ir padės jums gauti ekrane stabilų vaizdą. Trigeris sinchronizuoja skleistinę su Y įvado signalu.

3 Osciloskopo Y stiprinimas nustatytas ties 2 V · cm^{-1}, o skleistinė – ties 0,5 ms · cm^{-1}. Nustatykite signalų, pavaizduotų 13.U4 pav., įtampą „nuo smailės iki smailės", efektinę įtampą ir dažnį.



13.U4 pav. EO pėdsakai

Dviejų spindulių osciloskopu galima palyginti du signalus. Dviejų to paties dažnio signalų fazės gali nesutapti. Matant du signalus ekrane vienu metu, galima išmatuoti fazių skirtumą kaip horizontalų atstumą tarp tų dviejų pėdsakų ekvivalenčių taškų.

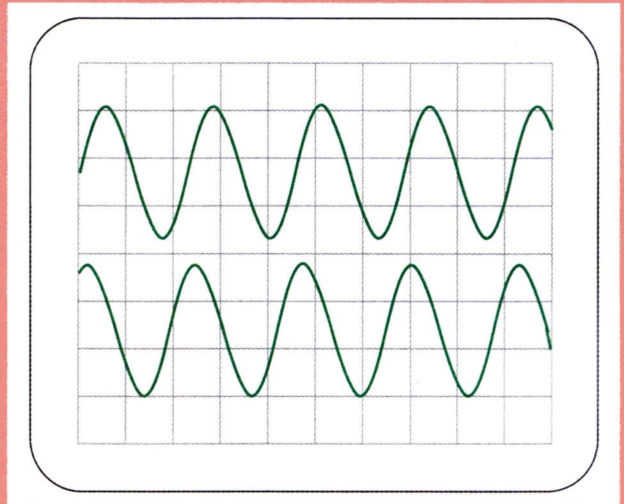


13.U5 pav. Fazių skirtumas

4

a) Nubraižykite du kintamosios srovės signalus, kurių fazės skiriasi **(i)** 90°, **(ii)** 180°.

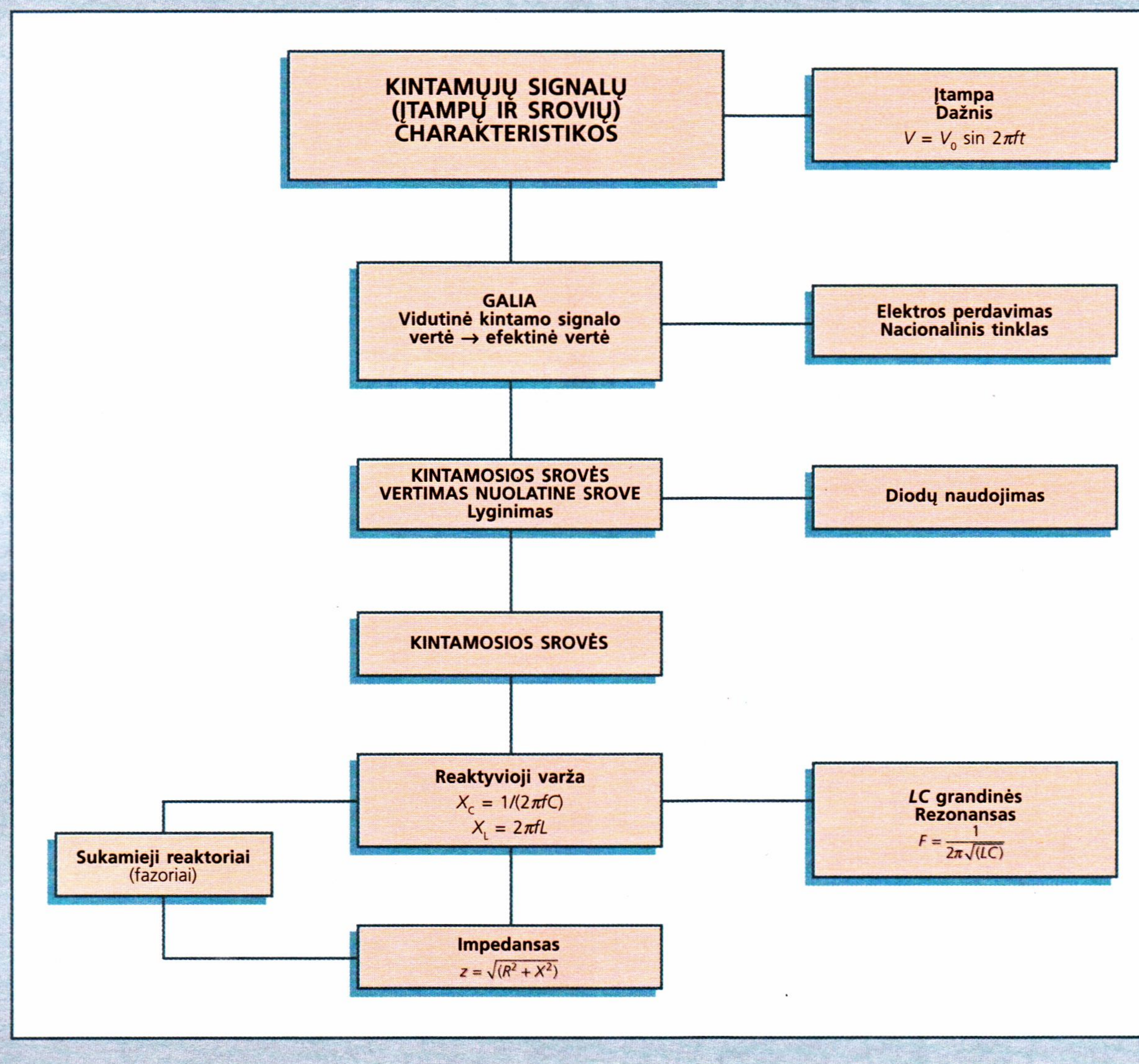
b) Kai skleistinė nustatyta 1 ms · cm^{-1}, raskite dviejų signalų, pavaizduotų 13.U6 pav., fazių skirtumą, išreikštą **(i)** ms ir **(ii)** laipsniais.



13.U6 pav.

KINTAMOSIOS SROVĖS IR ELEKTROS ENERGIJA

Šiame skyriuje susipažinote su kintamosios srovės, tiekiamos Nacionalinio tinklo, savybėmis: kaip elektros energija perduodama ir vartojama kintamosios srovės pavidalu (arba paverčiama nuolatine srove) grandinėse. Žemiau pateiktoje šio skyriaus schemoje apžvelgtos ir susietos pagrindinės sąvokos, kurias išmokote. Pasinaudokite schema mokydamiesi pagal programą, ir pasitikrinkite, ar nuodugniai susipažinote su kintamąja srove, išsiaiškinkite klausimus, kuriuos gali tekti nuodugniau panagrinėti.

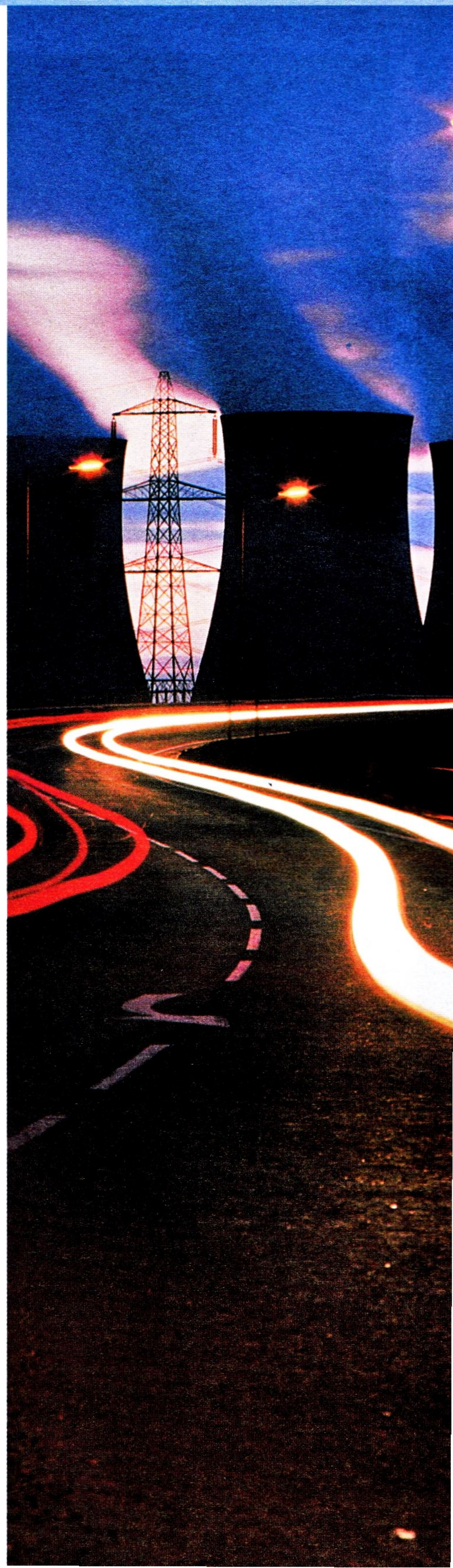


ŠILUMINĖ FIZIKA

GYVYBĖS PAGRINDĄ sudaro cheminės reakcijos, kurios gali vykti tik ribotame temperatūrų intervale – intervale, koks būna daugumoje Žemės vietovių. Tačiau šios temperatūros dažnai netinka žmonėms: pagalvokite apie tą energiją, kurią naudojame savo būstams ar darbo vietai sušildyti (arba atvėsinti) iki žmogui tinkamos temperatūros.

Šiame skyriuje aptariami šiluminiai pokyčiai, turint galvoje tai, kas atsitinka medžiagoms, kai jos šildomos, keičia būvį arba kai kinta jų temperatūra. Sužinosime ir kaip įvairių medžiagų šiluminės savybės nulemia, kurią jų pasirinksime skirtingiems praktiniams tikslams.

Šiluminiai efektai svarbūs prietaisuose, atliekančiuose darbą, kaip antai garo turbinose, benzino varikliuose ir dyzeliniuose varikliuose. Termodinamika aprėpia šildymą ir darbą. Mokydamiesi šią fizikos sritį, sužinosite apie entropiją ir apie neišvengiamus tikimybės dėsnius, kurie lemia, kad galų gale visas mūsų energijos vartojimas baigiasi aplinkos šildymu.



14 Energija ir temperatūra



KAIP IR DAUGUMA KNYGŲ, šioji buvo parašyta tik po daugelio užsitęsusių iki nakties vakarų ir daugybės kavos puodelių, – dažniausiai tirpios kavos.
Tirpios kavos pramonė išsiplėtė iki daugelio milijonų svarų rinkos nuo tada, kai ji gimė XX a. ketvirto dešimtmečio pabaigoje. O naujausias patobulinimas yra „užšaldyto produkto džiovinimas", kuris suteikia kavai daug geresnį aromatą nei bet kada anksčiau.
Pakepinus ir sumalus kavos pupeles, ekstrahuojamos tirpios kieto pavidalo medžiagos ir kvapieji junginiai. Šiame mišinyje yra labai daug vandens, kuris sulipintų granules. Tenka išgarinti vandenį, neprarandant skonio ir kvapo.
Užšaldant ir džiovinant, mišinys ataušinamas iki šiek tiek žemesnės nei 0 °C temperatūros (jis vis dar būna lipnus), ir pučiamas oras, kad susidarytų reikiamo tankio „putos". Po to šios putos smarkiai atšaldomos ir sutrupinamos į mums pažįstamas granules, matytas kavos stiklainiuose. O tada granulės labai sparčiai kaitinamos džiovinimo kameroje, esant labai žemam slėgiui, ir tokiu būdu ledas tuoj pat pavirsta garais, aplenkdamas skysčio stadiją, palikdamas kavai beveik visą buvusį jos aromatą ir skonį.
Didžiausios šiuolaikinės užšaldymo ir džiovinimo gamyklos gali pagaminti iki 7 milijonų puodelių kavos kasdien, – tai daugiau nei pakankama dar kelioms fizikos knygoms!

1 ENERGIJA IR DARBAS

Kai įsijungiame namuose elektrinį židinį, jo elementu, – paprastai susuktu į spiralę laidu, – teka srovė. Elektros energiją teikia jėgainėje vykstantys cheminiai pokyčiai, kai deginamos dujos, nafta arba anglis. Po to energija per tam tikros varžos židinio ritę perduodama kambario oro molekulėms. Oro molekulės kambaryje ima sparčiau judėti įvairiomis kryptimis. Šis padidėjęs judėjimas ir sudaro vadinamąjį oro įšilimą.

Energiją iš židinio oro molekulėms galime perduoti gana efektyviai. Tačiau negalime vėl lengvai panaudoti energijos iš naujo ir vėl paversti šio padidinto oro molekulių judėjimo į energiją, kurią būtų galima grąžinti elektros grandine. Energijos perdavimas irgi kartais keblus. **Termodinamika** yra tas mokslas, kuris aprašo, kaip pakinta sistemos, kai keičiasi jų energijos turinys. Ji nusako ir paaiškina tuos perdavimo procesus.

Galime apibrėžti šildymą kaip tokį procesą, kai energija perduodama iš vieno kūno, kurio temperatūra aukštesnė, kitam kūnui, kurio temperatūra žemesnė. 7 skyriuje (155 p.) sužinojome, kaip gauti temperatūrų skalę, o šiame skyriuje pažvelgsime į praktinius metodus temperatūrai matuoti.

Kai šiluminė energija perduodama *iš* kūno, tame kūne atomų ir molekulių judėjimo kiekis sumažėja. Šiluminės energijos perdavimas *į* kitą kūną reiškia, kad ten vyksta atomų ir molekulių judėjimo padidėjimas. Bus dar ir nedidelis potencinės energijos pokytis, kadangi atstumai, taigi ir jėgos tarp molekulių, truputį pasikeis.

Kaitimo prigimtis nuo seno vertė mokslininkus gerokai pasukti galvas. Mat anksčiau dar buvo nežinoma tai, ką dabar apie medžiagos sandarą suprantame mes, – kad ji sudaryta iš atomų. Grafas Rumfordas aštuonioliktojo amžiaus pabaigoje susidomėjo, kokiu būdu, kai gaminamos patrankos, gręžiami stori metalo strypai įkaista. Tačiau didžiulis žingsnis buvo žengtas, kai Džaulis parodė, jog mechaninis darbas gali būti paverstas šilumine energija, ir pademonstravo tai pakilusia cilindre esančio vandens temperatūra (žr. 61 p.).

Galime pademonstruoti, kaip mechaninis darbas virsta šilumine energija (vidinės energijos pavidalu), naudodami švininius šratus uždarame cilindriniame vamzdyje. Vamzdis keletą kartų apverčiamas, kad šratai kiekvieną kartą pabirtų iš vieno galo iki kito. Kai švininiai šratai sveria 150 g (0,15 kg) ir kiekvienas kritimas yra 0,75 m atstumu, galima apskaičiuoti tų švininių šratų temperatūros pokytį po 100 kritimų.

- Masėms krintant, dėl gravitacijos jėgos atliekamas darbas. Šis darbas išreiškiamas taip:

$$\text{atliktas darbas} = \text{švino masė} \times \text{gravitacijos suteikiamas pagreitis} \times \text{kritimo ilgis} \times \text{kritimų skaičius}$$
$$= 0{,}15 \times 9{,}8 \times 0{,}75 \times 100 \text{ J} = 110 \text{ J}$$

- Kai švininiai šratai krinta, darbas virsta kinetine energija.
- Bet tie švininiai šratai vamzdžio dugne staiga sustabdomi. Tuo metu energija virsta vidine šratų energija. Dėl to padidėja švino atomų judesio kiekis ir potencinė energija. Visas atliktas darbas panaudojamas švino temperatūrai pakelti dydžiu ΔT.

Daugiau apie vidinę energiją žr. 54 ir 319 p.

DŽAULIO TERMODINAMIKOS DARBAI

DŽEIMSAS PRESKOTAS DŽAULIS (*Joule*) kilo iš pasiturinčių aludarių šeimos Selforde ir savo ankstyvuosius eksperimentus atliko alaus daryklos laboratorijoje. Jis buvo pakankamai turtingas ir galėjo sau leisti eksperimentuoti. Savo medaus mėnesio metu laiką leido, išradinėdamas tikslų termometrą matuoti vaizdingo krioklio viršaus ir apačios temperatūrų skirtumui.

Pirmasis Džaulio termometras matavo ± 0,02 °C tikslumu, o paskesnieji – ±0,005 °C tikslumu. Šitaip tiksliai matuoti temperatūras buvo didžiulis pasiekimas ir Džauliui būtinas nagrinėjant mechaninio darbo virtimą šiluma.

Džaulis buvo mokomas privačiai namuose ir negavo specialaus matematinio išsilavinimo, taigi jis negalėjo pasivyti naujojo termodinamikos mokslo. Tačiau jis pelnė Viljamo Tomsono (lordo Kelvino) paramą, ir drauge jie daug ko pasiekė termodinamikoje, Džaulis – savo praktiniais gabumais, o Tomsonas – pateikdamas teoriją.



14.1 pav. Džeimsas Preskotas Džaulis (1818–1889)

?

A Apskaičiuokite atliktą darbą ir susidariusią energiją po 100 kritimų, jei 250 g švino šratų naudojama tame pačiame vamzdyje. Įsitikinkite, kad temperatūros pokytis vėl yra 5,7 K.

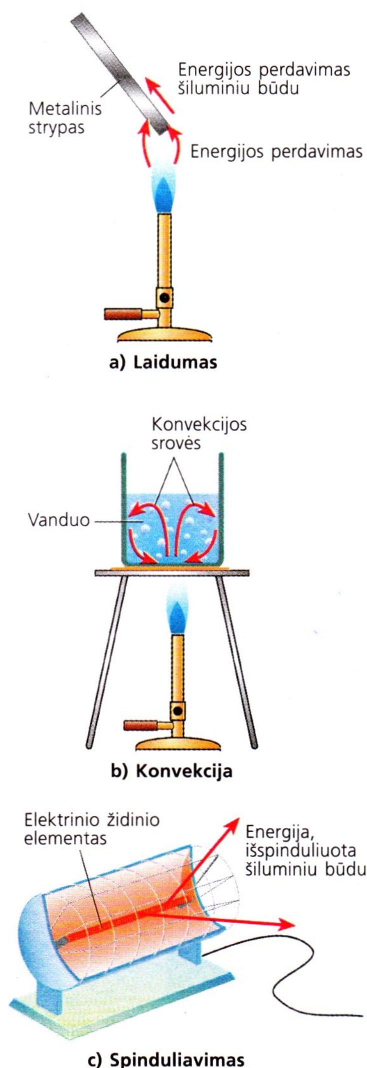
- Švino savitoji šiluma (žr. 309 p.) yra 129 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Energijos kiekis, suteiktas šviniams šratams, yra toks:

  energija (J) = švino masė × švino savitoji šiluma × temperatūros pokytis
  $= 0{,}15 \times 129 \times \Delta T = 19{,}4 \times \Delta T$
- Prilyginus darbą energijai (J), $110 = 19{,}4 \times \Delta T$

  Taigi temperatūros pokytis yra $\Delta T = 110/19{,}4 = 5{,}7$ K

Šis temperatūros pokytis bus juntamas, net jei dalis energijos ir prarandama aplinkoje. Įsidėmėkite, kad švininių šratų masė panaudojama du kartus: kartą – atliktam darbui, ir kartą – energijai, kuri perduota šviniams šratams. Tai reiškia, kad temperatūros pokytis nepriklauso nuo panaudotų šratų masės, ir nebūtina ją nurodyti. Padidinus šratų masę, padidėja atliekamas darbas, bet taip pat padidėja ir masė, kurią reikia šildyti. Skaičiuodami galėjome masei panaudoti kokį nors simbolį, o vėliau suprastinti masę kiekvienoje lygybės pusėje.

2 ŠILUMINIS ENERGIJOS PERDAVIMAS



14.2 pav. **Šiluminis laidumas, konvekcija ir spinduliavimas**

Yra trys šiluminio energijos perdavimo būdai: **laidumas, konvekcija** ir **spinduliavimas** (14.2 pav.).

Laidumas

Kietajame kūne energija perduodama vykstant procesui, vadinamam **šiluminiu laidumu.** Atomai kietajame kūne virpa, o didėjant temperatūrai, virpesių amplitudė didėja. Atomų energija padidėja, ir padidėja vidinė kietojo kūno energija. Atomų virpesiai gana panašūs į prijungtų prie spyruoklių gardelės masių rinkinio virpesius.

Energija keliauja kietuoju kūnu dėl sistemos virpesių. Gretimi atomai vienas po kito priverčiami smarkiau virpėti. Metaluose „laisvieji" elektronai irgi įgyja papildomos energijos ir didėjant temperatūrai keliauja šiek tiek greitėliau. Svarbu, kad jie padeda energiją pernešti metalu ir perduoti energiją tolimesniems atomams.

Konvekcija

Yra vidinės energijos judėjimas takioje terpėje (skystyje arba dujose), – šiluminės **konvekcijos** procesas (kartu egzistuoja ir laidumas). Takios terpės dalelės, paprastai – molekulės, gali laisvai judėti nepriklausomai viena nuo kitos. Jų kinetinė energija didėja, suteikus takiajai terpei daugiau šiluminės energijos. Kaistanti takioji terpė priversta plėstis, ji tampa retesnė. Dėl gravitacijos poveikio retesnė (aukštesnės temperatūros) takioji terpė kyla aukštyn pro tankesnę terpę, kuri tuomet nusileidžia, užimdama šios vietą. Šis judėjimas yra labai efektyvus būdas perkelti toms molekulėms, kurioms buvo suteikta papildoma kinetinė energija. Susidaro molekulių srovės, vadinamos **konvekcijos srovėmis.**

Konvekcijos srovės priverčia šiluminę energiją cirkuliuoti virtuvinėse orkaitėse. Virėjai žino, kad retesnis karštas oras kyla į orkaitės viršų. Gaminant daugiau nei vieną patiekalą, jie kiekvienam parenka tinkamą lentyną. Daugumoje šiuolaikinių orkaičių įtaisytas elektrinis ventiliatorius, kuris ir padidina cirkuliacijos spartą, ir tolygiau pasiskirsto temperatūrą. Tai vadinama **priverstine konvekcija,** o jei šiluminė energija paliekama savaime pasiskirstyti, toks procesas vadinamas **natūralia konvekcija.**

Spinduliavimas

Energija gali būti perduota elektromagnetinio **spinduliavimo** būdu (žr. 2-ąją knygos dalį, 16 sk.). Visi daiktai skleidžia ir atspindi elektromagnetinį spinduliavimą. Mums yra pažįstamas spinduliavimas šviesos bangų forma. Tačiau, kylant kūno temperatūrai, tiek dažnių intervalas, tiek skleidžiamų spindulių kiekis didėja.

Elektrinis židinys daug savo energijos spinduliuoja regimojoje srityje, – matome, kad elementas švyti oranžiniai ar raudonai. Žvaigždės yra daug karštesnės ir daug savo energijos išspinduliuoja ultravioletinių spindulių srityje.

Kita vertus, šiluminio vaizdo kameromis galima užfiksuoti ilgesnių bangų ir mažesnių dažnių infraraudonąjį spinduliavimą nei regimosios srities. Tai reiškia, kad galima aptikti kūnus, esančius vėsesniame fone. Vaizdo gavimo kameras naudoja gaisrininkai, kad rastų žmones, kuriems degančiuose pastatuose nuo dūmų pasidarė bloga, o pakabintos po policijos malūnsparniais, šios kameros gali aptikti nusikaltėlius, sprunkančius iš nusikaltimo vietos.





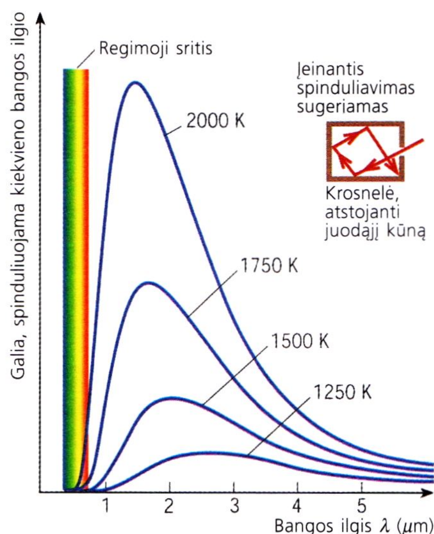
14.3 pav. **Tirštuose dūmuose ar naktį gaisrininkai suranda nukentėjusiuosius, naudodami šiluminio vaizdo kamerą**

Juodasis kūnas

Objektas, visiškai sugeriantis šiluminį visų bangos ilgių spinduliavimą, vadinamas **juoduoju kūnu.** Jis neatspindi jokio į jį krintančio spinduliavimo, tačiau jis gali skleisti visų bangos ilgių spindulius. 14.4 pav. atvaizduotos juodojo kūno spinduliavimo kreivės.

Krosnelė su labai maža anga ir storomis izoliuojančiomis sienelėmis, beveik atitinka juodąjį kūną. Spinduliavimas, nukreiptas į krosnelės vidų pro angą, sugeriamas vidinių sienelių. Tačiau krosnelės sienos bus labai karštos (jos bus krosnelės temperatūros), taigi skleis visų bangų ilgių spindulius, kurių nedidelė dalis ištrūks pro angą.

14.4 pav. atvaizduota, kad, didėjant temperatūrai, spinduliavimas iš juodojo kūno irgi didėja (atitinka plotą po kreive). Bangos ilgis, ties kuriuo vyksta didžiausias spinduliavimas, mažėja, didėjant temperatūrai. Štai dėl ko kaitinant metalo – imkim plieną – gabalą, jis iš pradžių atrodo dulsvai raudonas, tačiau kuo labiau metalas įkaista ir smailė pasislenka pagal skleidžiamą šviesą link mažesnių bangos ilgių, tuo ryškiau metalas tampa oranžinis.



14.4 pav. **Juodojo kūno spinduliavimas ir juodojo kūno schema**

3 TEMPERATŪROS MATAVIMAS

7 skyriuje (155 p.) aptarėme, kaip pasinaudoti idealių dujų savybėmis, apibrėžiant temperatūros skalę, atkartojamą bet kur. Ši skalė yra Kelvino skalė. Taip pat matėme, kad pastovaus tūrio dujų termometru išmatuojama temperatūra. Tačiau tokį termometrą nelengva nešiotis ir naudoti.

Temperatūra gali būti matuojama panaudojant *bet kurią fizinę savybę, kintančią kartu su temperatūra*. Tačiau turime sugebėti kalibruoti tą pokytį standartinės Kelvino skalės, gautos dujiniu termometru, atžvilgiu. Neprivalome laikytis tos pačios Kelvino skalės, tačiau vienintelės kitos dabar plačiai vartojamos skalės yra šimtalaipsnė ir Celsijaus skalės (jas aptarsime netrukus).

Fizinių savybių, kurias galėtume panaudoti, pavyzdžiai yra:

- **ilgis,** pavyzdžiui, spirito stulpelio ilgis stikliniame termometre su skysčiu,
- **įtampa,** pavyzdžiui, sukuriamoji termoporoje,
- laido (dažnai platininio) arba puslaidininkio (termistoriaus) **elektrinė varža,**
- **slėgis** dujiniame termometre,
- **šiluminis spinduliavimas** (panaudojant pirometrą).



B Kaip manote, kas atsitiktų, kai temperatūra taptų lygi nuliui?

Temperatūros skalės

Termodinaminė skalė (arba absoliutinė skalė, arba Kelvino skalė)

Tai – skalė, jau aptarta 7 skyriuje. Vienintelis fiksuotas taškas pasirenkamas ties vadinamuoju trigubuoju vandens tašku, ir apibrėžiamas esantis 273,16 K. Temperatūros vienetas kelvinas yra 1/273,16 šio trigubojo taško temperatūros. Tuomet nuo šio vieneto didumo priklauso, kokioje stadijoje nusileisime iki skalės nulio. Nėra neigiamos temperatūros, ir laboratorijoje niekada negalime visiškai pasiekti nulio.

Kadangi mokslininkams reikia atlikti matavimus labai plačiame temperatūrų intervale, jie apibrėžė keletą papildomų fiksuotų taškų termometrų kalibravimui. Tačiau visoms skalėms svarbiausias yra trigubasis taškas.

Celsijaus ir šimtalaipsnė skalės

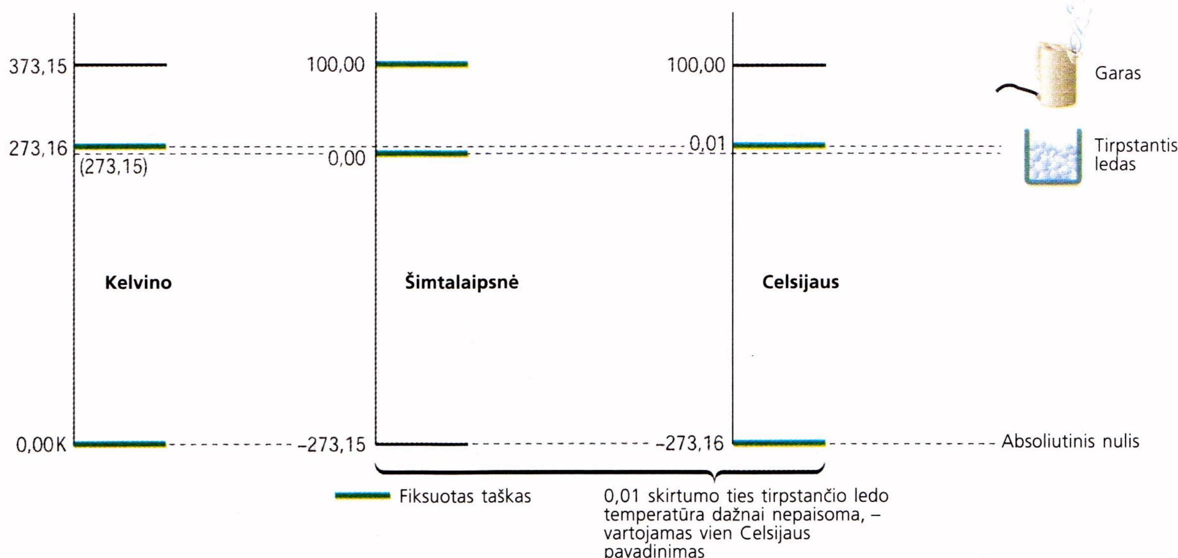
Celsijaus skalė išvedama iš termodinaminės (Kelvino) skalės, panaudojant tą patį vieną fiksuotą tašką, kaip ir termodinaminėje skalėje. Bet pagal Celsijų ledo taškas yra 0,01 °C, o garų taškas yra 100,00 °C.

Sąryšis toks: $t = T - 273{,}15$,

kur t yra temperatūra Celsijaus skalėje, o T yra temperatūra termodinaminėje skalėje.

Be to, buvo sukurta praktiška skalė nebrangiems termometrams, vadinama **šimtalaipsne skale**. Ji kalibruojama, naudojant du fiksuotus taškus (14.5 pav.): ledo, apibrėžiamą esant 0°, ir garų (esant standartiniam slėgiui), apibrėžiamą esant 100° šimtalaipsnėje skalėje.

Dažnai nepaisoma mažo 0,01 °C skirtumo, apibrėžiant abi skales ties ledo tirpimo temperatūra, taigi skalė, kur ledo temperatūra yra 0°, vadinama Celsijaus skale, o terminas „šimtalaipsnė“ jau nevartojamas. Visas intervalas padalijamas į šimtą atkarpų, kiekviena atkarpa atitinka vieną laipsnį.



14.5 pav. **Absoliutinė (Kelvino), šimtalaipsnė ir Celsijaus temperatūros skalės**

Fizinės savybės temperatūrai kalibruoti

Kalibruoti lengva, jei naudojame ilgio pokytį. Tačiau bendriau imant, turime žinoti savybės (čia – ilgio) vertę fiksuotuose taškuose ir kalibruoti proporcingai.

Pažvelkime, kaip šitai vykdoma gyvsidabriniam termometrui:

- l_{100} yra gyvsidabrio siūlo ilgis ties 100°.
- l_0 yra gyvsidabrio siūlo ilgis ties 0°.
- l_θ yra gyvsidabrio siūlo ilgis ties θ°.
- Kiekvieno laipsnio atkarpa bus $(l_{100} - l_0)$ / 100 ilgio.
- Ilgio pokytis dėl temperatūros pakilimo nuo 0° iki θ° yra $(l_\theta - l_0)$.
- Temperatūrą θ laipsniais gauname iš ilgio pokyčio, padaliję iš vieno laipsnio atkarpos ilgio:

$$\theta = \left[\frac{l_\theta - l_0}{(l_{100} - l_0)/100}\right] = \frac{l_\theta - l_0}{l_{100} - l_0} \times 100°$$

Galėtume naudotis **platininės varžos termometru**, matuodami varžas R_0 esant 0°, R_{100} esant 100° ir R_θ esant nežinomai temperatūrai θ:

$$\theta = \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100°$$

Visi gyvsidabriniai termometrai turėtų rodyti tiksliai tą patį, jei yra teisingai kalibruoti. Taip pat turėtų būti ir su platininės varžos termometrais. Ir dar: visi abiejų rūšių termometrų rodmenys irgi turi sutapti. Tačiau negalime iš anksto tarti, kad kiekvienam temperatūros pokyčiui vienu laipsniu gyvsidabrio siūlo ilgis arba platinos varža pasikeičia lygiai tokia pačia verte. Pavyzdžiui, gyvsidabrio stulpelio ilgio pokytis tarp 9 °C ir 10 °C ir tarp 40 °C ir 41 °C gali skirtis. Panašiai varža skirtinguose laipsnių intervaluose gali keistis nevienodai. Taigi šių dviejų termometrų rūšių temperatūros rodmenys gali būti ne visai tiksliai vienodi tarp fiksuotų taškų. Štai dėl ko mums reikalinga absoliutinė skalė.

Gyvsidabriniai termometrai nedažnai naudojami šiuolaikinėse laboratorijose, nes dūžta. Gyvsidabrio garų slėgis nemažas, o jis pats yra šiek tiek nuodingas.

C Rodmenys, naudojant varžos termometrą, yra 40,0 Ω ties ledo tašku, 86,3 Ω ties garų tašku ir 77,8 Ω, esant nežinomai temperatūrai θ. Apskaičiuokite šią temperatūrą, išmatuotą Celsijaus skalėje. Kokia ši temperatūra Kelvino skalėje?

Termometrų naudojimas

Termometro pasirinkimas priklausys nuo temperatūrų intervalo ir pritaikymo vietos. Gyvsidabrio termometrai niekam tikę žemiau –39 °C, kur yra gyvsidabrio užšalimo taškas. Bet juos galima naudoti platesniame temperatūrų intervale, negu stiklinius termometrus su spiritu. Didelis termometras netinka mažų medžiagos kiekių temperatūrai matuoti. Tai dėl to, kad, kol termometras pasiekia termodinaminę pusiausvyrą, medžiagai gali būti perduota arba iš jos paimta energija, taigi gali pasikeisti ir matuojama temperatūra. Varžinis termometras yra tinkamas pasirinkimas, jei reikalingas didelis tikslumas. 14.1 lentelėje pateikti pagrindiniai termometrų tipai, su jų privalumais ir trūkumais.

14.1 lentelė. **Įvairūs termometrų tipai**

Termometras	Reagavimo į temperatūrą parametras	Pagrindiniai privalumai	Pagrindiniai trūkumai	Temperatūrų intervalas
Stiklinis su skysčiu	Tūrio pokytis (t. y. kintantis gyvsidabrio ar alkoholio siūlo ilgis)	Paprasti naudoti, pigūs, nešiojami	Trapūs, riboto intervalo, netinkami mažiems objektams	Gyvsidabrio: 234–723 K; etilo alkoholio: 173–323 K
Pastovaus tūrio dujų termometras	Fiksuotos dujų masės slėgis, esant pastoviam tūriui	Rodo absoliutinėje skalėje, tikslūs, plataus intervalo	Gremėzdiški ir nepatogūs, lėtai nusistovi, tiesiogiai netinkami mažiems objektams	3–500 K
Varžinis	Platinos laido varža	Tikslūs, plataus intervalo, parankūs mažiems temperatūros pokyčiams	Lėtai nusistovi, netinkami mažiems objektams	15–900 K
Termopora	Dviejų nepanašių metalų sandūros elektrovara	Gali matuoti mažus skirtumus, greitai nusistovi, plataus intervalo, rodmenys gali būti skaitomi iš tolo	Mažos įtampos, taigi reikalingas elektroninis stiprinimas	25–1400 K (priklauso nuo metalų)
Termistorius	Kintanti puslaidininkio varža	Teikia elektrinį signalą, tinkamą kompiuterinėms grandinėms	Reikia kalibruoti, nelabai tikslūs	200–700 K
Optinis pirometras	Srovė pro lempos siūlą, atitinkanti objekto spalvą	Nereikia kontakto su karštu objektu, paprastas naudoti, nešiojamas	Reikia kalibruoti, nelabai tikslūs	Virš 1250 K

4 OBJEKTO KAITINIMAS

Iš kasdienės patirties žinome, kad kai kuriems daiktams reikia daugiau energijos jų temperatūrai vienodai pakelti. Pavyzdžiui, vandeniui pašildyti vienu kelvinu suvartojama daugiau energijos, negu reikia tai pačiai vario masei. Vandens molekulėms reikia daugiau energijos, kad jos judėtų pakankamai greitai ir rodytų pakilimą vienu kelvinu, negu vario atomams, kurie iš esmės virpa. Kūno **šiluminė talpa** C yra energijos kiekis, reikalingas jo temperatūras pakelti vienu kelvinu. Jos vienetas yra $kJ \cdot K^{-1}$.

Savitoji šiluma, molinė šiluma ir fazinio virsmo šiluma

Šiluminė talpa apibrėžiama konkrečiam bet kokios masės objektui. Bendresnė savybė būtų pravartesnė. Tokia yra **savitoji šiluma** *c*, kuri apibrėžiama vienos medžiagos *vienetinei masei*. Kiekviena gryna medžiaga turi savo konkrečią savitosios šilumos vertę tam tikroje temperatūroje (tačiau ši vertė gali kisti, kintant medžiagos temperatūrai).

Galime palyginti šiluminės talpos C ir savitosios šilumos c išraiškas. Tarkime, kaitiname m (kilogramų) masės vienos medžiagos objektą, suteikdami jam ΔQ (kilodžaulių) energiją, dėl ko jo temperatūra pakyla ΔT (Celsijaus laipsnių); tada

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ ir } c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}$$

PAVYZDYS

K 3,0 kW elektrinis virdulys naudojamas užvirinti 1,50 kg vandens; pradinė temperatūra 18,0 °C. Tarę, kad visa energija sunaudojama vandens šildymui, apskaičiuokite energijos kiekį ir laiką, reikalingą vandeniui užvirinti. Savitoji vandens šiluma = 4,20 kJ · kg^{-1} · K^{-1}.

A Reikalinga energija = savitoji šiluma × masė × temperatūros pakilimas
= 4,20 × 1,5 × 82 kJ
= 517 kJ.

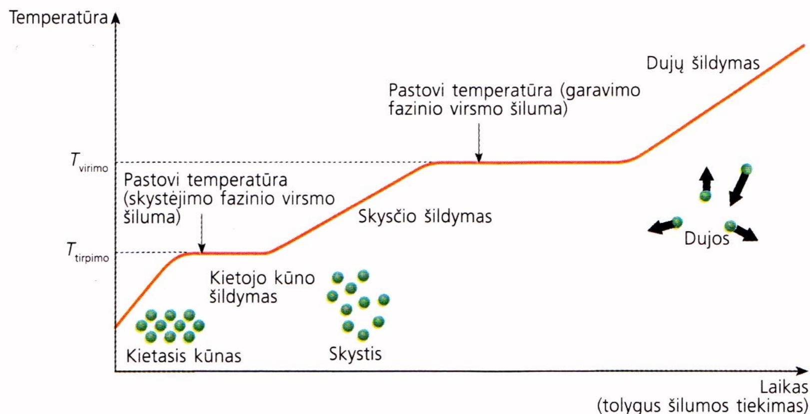
Reikalingas laikas = reikalinga energija / kaitinimo sparta
= 517 kJ / 3,0 kJ · s^{-1}
= 172 s, arba 2 min. 52 s.

Galime vartoti kitą šiluminį dydį – **molinę šilumą,** ypač dujoms. Jau iš pavadinimo aišku, kad tai yra energija, reikalinga vienam medžiagos moliui sušildyti vienu kelvinu.

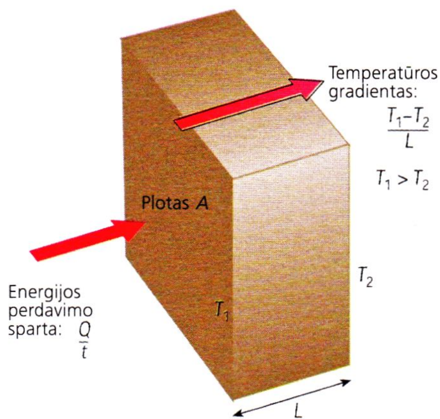
Jau sužinojome 143 puslapyje, kad kai medžiaga pereina iš vieno būvio į kitą, pavyzdžiui, iš kietojo į skystą, virsmui vykti reikalinga energija, vadinama **fazinio virsmo šiluma.** Fazinio virsmo šiluma nesukelia jokio temperatūros pokyčio. Ir dar: daugumos medžiagų savitosios šilumos skirtingos, priklausomai nuo to, ar medžiaga kietoji, skystoji ar dujinė. Jei medžiagai teiksime energiją vienoda sparta, matysime, kokį poveikį šie savitosios šilumos skirtumai turės šilimo spartai, ir galėsime užfiksuoti temperatūrą, kurioje vyksta būvio kitimas (14.6 pav.). Sutariame, kad energijos nuostolių į aplinką nėra.

? **D** virdulys pateiktame pavyzdyje perduos vandeniui energiją su mažesniu nei 100 procentų našumo koeficientu. Išvardykite būdus, kuriais energija iš virdulio prarandama, keliant vandens temperatūrą.

■ Žr. 1 klausimą.



14.6 pav. **Mežiagos tolygus šildymas, parodant savitųjų ir fazinio virsmo šilumų įtaką**



14.7 pav. **Šiluminės energijos srautas pro medžiagos luitą**

Šiluminis laidumas

Kai vienas kūno galas šildomas, užtrunka šiek tiek laiko, kol vidinė energija pasklinda (šiluminio laidumo būdu) iki kito galo. Kitaip sakant, trunka tam tikrą laiką nuo šildomojo galo žymaus temperatūros pokyčio iki atitinkamo pokyčio tolimajame gale.

Pasiekus šiluminę pusiausvyrą, kūne bus temperatūrų skirtumas, jei tarsime, kad šildymas tęsiasi ir kad energija gali palikti tolimąjį galą. Tai, kaip lengvai energija gali būti perduota kūnu, priklauso nuo savybės, vadinamos **šiluminiu laidumu.** Tačiau greta šiluminio laidumo ir kiti veiksniai lemia, kiek energijos praeina kūnu. Dabar panagrinėsime visus tuos veiksnius.

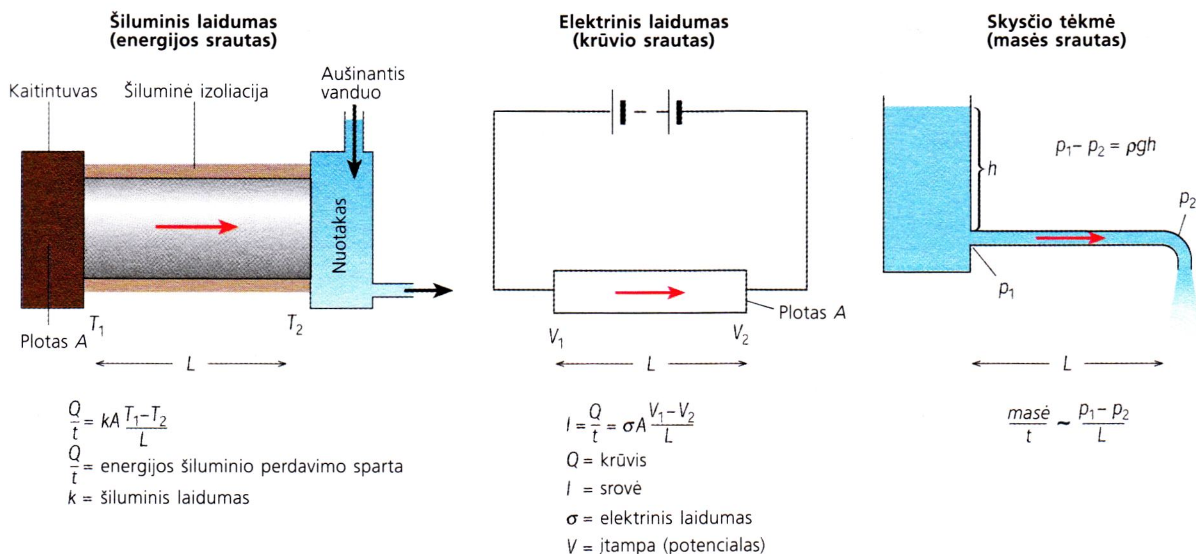
Imkime energijos srautą pro L metrų storio medžiagos luitą (14.7 pav.). Kad srūtų energija, turi būti temperatūros skirtumas tarp priešingų luito galų.

- Tariant, kad luitas visas yra iš tos pačios medžiagos, temperatūros gradientas bet kuriame taške tarp priešingų galų bus toks pats. Turime:

$$\text{temperatūros gradientas} = \frac{\text{temperatūros skirtumas}}{\text{luito storis}} = \frac{T_1 - T_2}{L}$$

Kuo didesnis temperatūros gradientas, tuo didesnė energijos tėkmės sparta.

- Tėkmė priklausys ir nuo luito skerspjūvio ploto A (m^2). Tai labai panašu į vandenį, tekantį vamzdžiu – tekančio vandens kiekis priklauso nuo vamzdžio skerspjūvio ploto ir nuo slėgių skirtumo tarp vamzdžio galų. Šiluminės energijos perdavimas panašus ir į krūvio srautą elektros laidininke – elektros srovė proporcinga laidininko skerspjūvio plotui ir elektriniam laukui (potencialo gradientui) išilgai laidininko (14.8 pav.).



14.8 pav. **Srauto procesų palyginimas**

- Srūvančios energijos kiekis priklauso nuo to, kaip lengvai medžiaga ją praleidžia. Varis yra geras laidininkas, tuo tarpu stiklas yra prastas laidininkas. Energijos tėkmės sparta proporcinga medžiagos **šiluminiam laidumui** k. Ši priklausomybė tokia pati, kaip ir tai, kokiu būdu elektrinio krūvio srautas priklauso nuo laidininko elektrinio laidumo.

Energijos tėkmės sparta yra perduotos šiluminės energijos kiekis Q (kilodžaulių), padalytas iš laiko t (sekundžių). Turime:

$$\frac{Q}{t} \sim \frac{T_1 - T_2}{L}$$

$$\frac{Q}{t} \sim A$$

$$\frac{Q}{t} \sim k$$

Iki šiol k nebuvo matuojamas, taigi galime laikyti jį proporcingumo konstanta:

$$\frac{Q}{t} = kA\frac{T_1 - T_2}{L}$$

Atkreipkite dėmesį, kad šioje lygtyje T_1 yra didesnė už T_2, ir kad energija *mažėja* priešinga temperatūros gradientui kryptimi nuo aukštesnės temperatūros pusės link žemesnės temperatūros pusės.

k vienetai

k vienetai bus tokie, kokius nustatysime iš lygties.

$\frac{Q}{t}$ vienetai yra energija/laikas, t. y. $J \cdot s^{-1}$, arba W.

$A\frac{T_1 - T_2}{L}$ vienetai yra ilgis^2 × temperatūra / ilgis, t. y. $m^2 \cdot K \cdot m^{-1}$, kas lygu m · K. (Būtinai rašykite tašką tarp m ir K, nes kitaip tie simboliai reikš vieną tūkstantąją kelvino dalį.)

W = (k vienetai) × m · K.

Taigi k vienetai turi būti $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

5 ŠILUMINIS ENERGIJOS SRAUTAS

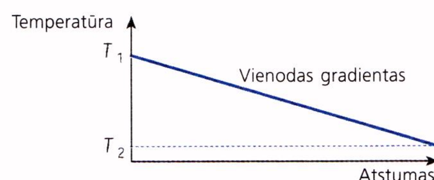
Srautas išilgai strypo

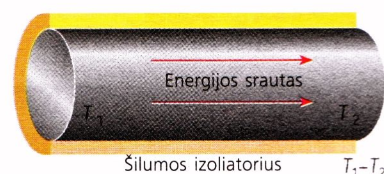
Tarkime, kaitiname vieną termiškai izoliuoto (t.y. padengto šilumine izoliacija) ilgo strypo galą. Sutariame, kad energijos srautas toks pat visuose taškuose išilgai strypo. Galime pavaizduoti šį srautą aibe lygiagrečių linijų (14.9 pav.), kaip ir vaizduodami tolygų vandens srautą vamzdžiu.

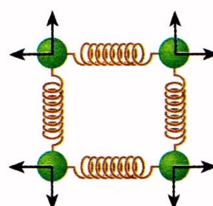
Kas vyksta atomų lygyje? Jau sakėme, kad galime įsivaizduoti atomus esant kietais rutuliukais, sukabintais spyruoklėmis visomis kryptimis (žr. 146 ir 304 p.). Šildant vieną strypo galą, atomai tame gale virpa vis didėjančia amplitude. Energija iš tų atomų virpesių perduodama gretimiems atomams. Ilgainiui visų atomų kietajame kūne virpesių amplitudė padidėja.

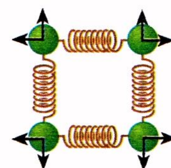
Po kurio laiko strypas pasiekia pusiausvyros padėtį, kai tiek pat energijos palieka tolimąjį galą, kiek jos įeina pro šildomąjį. Energija šiluminiu būdu perduodama strypu, ir tai reiškia, kad, kaip ir tikimasi, strype yra temperatūros gradientas. Tolimasis galas yra vėsesnis už šildomąjį. Galime sakyti, kad temperatūrų skirtumas varo energiją pro strypą, lygiai kaip įtampų skirtumas varo laidu elektros srovę.

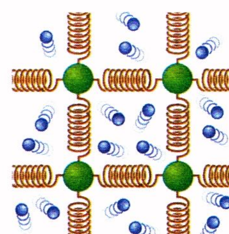
Kaip jau matėme (203 ir 304 p.), dalį energijos metale perduoda elektronai. Jie karštajame gale juda greičiau, nei šaltajame. Susidurdami su jonų gardele (rutuliukais mūsų rutuliukų ir spyruoklių modelyje), jie padeda energiją greitai pernešti strypu. Jau paminėjome, kad varis – tipiškas metalas – turi didelį šiluminį laidumą. Taip yra dėl jo laisvųjų elektronų.











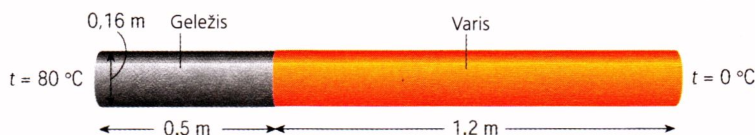
14.9 pav. **Šiluminis energijos srautas izoliuotame laidininke**

2-oje knygos dalyje sužinosite apie bangų ir dalelių dualumą. Metale atomų virpesiai perduodami strypo bangų pavidalu. Tačiau, lygiai kaip ir šviesa kartais aprašoma esanti dalelių, vadinamų fotonais ir neturinčių rimties masės, tėkmė, taip ir šių virpesių tėkmė gali būti laikoma dalelių be rimties masės judėjimu; jas pavadinsime *fononais*.

Žr. 2 klausimą. ■

PAVYZDYS

K 0,50 m ilgio geležies strypas ir 1,2 m ilgio vario strypas yra sujungti galais. Vienas geležinio strypo galas laikomas 80 °C temperatūroje, tuo tarpu tolimojo varinio strypo galo temperatūra palaikoma ties 0 °C ledo ir vandens mišiniu. Išoriniai strypų paviršiai padengti šilumine izoliacija, taigi nėra šiluminės energijos nuostolių. Abu strypai yra skritulio skerspjūvio, 0,16 m skersmens. Esant šiluminei pusiausvyrai, temperatūra ties metalų sujungimu yra T_j. Apskaičiuokite T_j ir energijos srauto spartą. Geležies šiluminis laidumas = 75 W · m^{-1} · K^{-1}; vario šiluminis laidumas = 390 W · m^{-1} · K^{-1}.



14.10 pav.

A Energijos srauto sparta kiekviename laidininke yra ta pati. Energijos srauto pro geležinį strypą sparta yra

$$\frac{Q}{t} = k_{\text{geležies}} A \frac{T_{80} - T_j}{0{,}50} \quad \text{(vatų)}$$

$$= \frac{75 \times \pi \times 0{,}08^2}{0{,}50} \times (T_{80} - T_j)$$

$$= (3{,}02)(80 - T_j)\ \text{W}$$

Energijos srauto pro varinį strypą sparta yra

$$\frac{Q}{t} = k_{\text{vario}} A \frac{T_j - T_0}{1{,}20} \quad \text{(vatų)}$$

$$= \frac{390 \times \pi \times 0{,}08^2}{1{,}20} \times (T_j - 0)$$

$$= (6{,}53)(T_j - 0)\ \text{W}$$

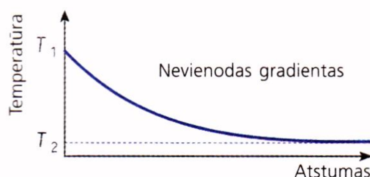
Sulyginę gauname:

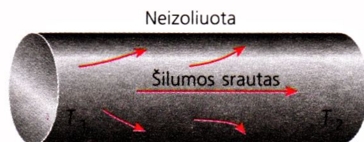
$$(3{,}02)\ (80 - T_j) = 6{,}53\ (T_j - 0)$$

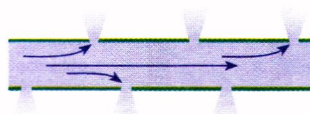
$$242 = 9{,}55 T_j$$

$$T_j = 25{,}3\ ^\circ\text{C}$$

E Kodėl pateiktajame pavyzdyje energijos srautas abiejuose laidininkuose yra vienodas?







Daržo žarna su skylutėmis vandeniui purkšti

14.11 pav. **Šiluminės energijos srautas neizoliuotame laidininke: jis panašus į vandens srautą daržo žarnoje su skylutėmis, tik laidininkas netenka energijos tolygiai, t. y. kiekviename savo paviršiaus taške**

Tarkime, kad strypas iš pateiktojo pavyzdžio nėra izoliuotas. Šituo atveju energija prarandama dėl šiluminių procesų iš strypo paviršiaus. Tai panašu į vandenį, ištekantį pro skylutes išilgai žarnos (tokia dažnai naudojama daržams ar sodams laistyti). Srauto linijos nebebus lygiagrečios (14.11 pav.). Dar daugiau, negalime laikyti temperatūros gradiento pastoviu dydžiu.

Srautas pro stiklinį langą

Šiluminės energijos srautas pro stiklinį langą yra labai svarbus praktikoje. Stiklo šiluminis laidumas yra mažas (14.2 lentelė), panašus į plytų. Tačiau dėl to, kad lango stiklo storis yra tiek daug mažesnis už namo plytų storį, yra svarbu mažinti energijos nuostolius pro langus. Labiausiai paplitęs būdas yra naudoti dvigubus stiklus. Dabar išnagrinėkite kitą pavyzdį.

14.2 lentelė. **Dažniausiai naudojamų statybinių medžiagų šiluminiai laidumai**

Medžiaga	Šiluminis laidumas (W · m^{-1} · K^{-1})
Plytos	1,0
Betonas	1,5
Stiklas	0,8
Medis	0,1–0,4

PAVYZDYS

K Kambaryje yra viengubo stiklo 2,2 m pločio, 1,2 m aukščio ir 5 mm storio langas. Tarę, kad kambaryje temperatūra ties stiklo paviršiumi yra 22 °C, o lauke – tik 3 °C, apskaičiuokite energijos nuostolius. Stiklo šiluminis laidumas yra 0,8 W · m⁻¹ · K⁻¹.

A Pasinaudojame lygtimi

$$\text{energijos srauto sparta} = \frac{Q}{t} = kA\frac{T_1 - T_2}{L} \text{ (vatų)}$$

$$= 0{,}8 \times (2{,}2 \times 1{,}2) \times \frac{(22-3)}{0{,}005}$$

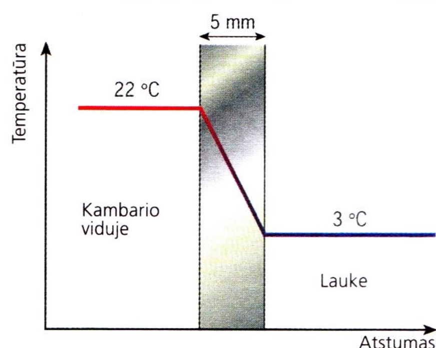
$$= 8026\,\text{W}$$

(Atkreipkite dėmesį, kad nebūtina °C paversti K, kadangi lygtyje yra temperatūrų skirtumas, o vienas Celsijaus laipsnis yra tokio pat didumo, kaip vienas kelvinas.)

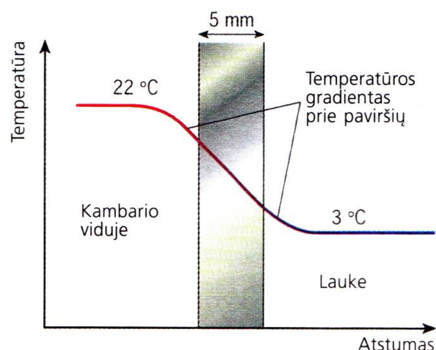
Dabar turėtume suabejoti šiuo modeliu. Prarandame iš kambario daugiau nei 8 kW šiluminės energijos, tad reikėtų labai didelio šildytuvo palaikyti temperatūrai ties 22 °C. Matyt, kažkas negerai. Tačiau skaičiai, kuriais rėmėmės, atrodo patikimi.

Klaida yra ta, kad neatsižvelgėme į nejudančio oro sluoksnius iš kiekvienos lango pusės. Oro šiluminis laidumas labai mažas (apytiksliai 0,025 W · m⁻¹ · K⁻¹). Dalis temperatūros kritimo bus prieš pat langą viduje, o dalis – tuoj pat už jo išorėje. Todėl temperatūrų skirtumas tarp priešingų stiklo pusių ir temperatūros gradientas pro lango stiklą ko gera bus mažesnis negu ėmėme skaičiavimuose. Bendroji temperatūros kreivė yra ne tokia, kaip 14.12a) pav., kurią tarėme esant, bet yra tokia, kaip vaizduojama 14.12b) pav.

Atkreipkite dėmesį, kad turi būti kažkoks temperatūros gradientas ties abiem tais stiklo paviršiais; kitaip energija negalės patekti į vidų arba išeiti. Reikėtų atlikti matavimus, norint rasti tikrąją kreivę arti lango stiklo. Toli nuo kambario langų energija daugiausia perduodama konvekcijos būdu.



a)



b)

14.12 pav. **Temperatūros kreivės prie stiklo lango ir jo viduje**: a) **kreivė, gauta atlikus skaičiavimus;** b) **realistiškesnė kreivė**

Dvigubi stiklai ir šiluminė varža

Dauguma naujų langų Britanijoje dabar yra dvigubo stiklo. Paprastai stiklas būna 4 mm storio, nors atstumas tarp stiklų yra ne toks standartinis, dažnai – 5 mm langams ir 10 mm vidaus kiemo durims. Pasinaudodami analogija su krūvio srautu pro laidininką, galime pastebėti, kad mūsų dvigubų stiklų elementas gali būti modeliuojamas kaip trys nuosekliai sujungtos varžos iš stiklo, oro ir stiklo. Taigi, šiluminė dvigubų stiklų varža R bus trijų sluoksnių šiluminių varžų suma. Vienam sluoksniui šiluminė varža R apibrėžiama kaip t/kA, kur t yra sluoksnio storis, A – jo plotas, o k yra šiluminis laidumas. Kai sluoksnių yra trys, sumavimą atitiks

$$\sum \frac{t}{kA},$$

kur simbolis Σ (didžioji graikų abėcėlės raidė sigma), reiškiantis „suma", apima tris sluoksnius: stiklo, oro ir stiklo.

Dabar k_{oro} = 0,025 W · m⁻¹ · K⁻¹, o k_{stiklo} = 0,8 W · m⁻¹ · K⁻¹. Todėl, turint 4 mm storio langus, 10 mm tarpą ir 1 m² plotą, gauname, kad

$$\text{šiluminis laidumas} = \frac{4\times10^{-3}}{0{,}8} + \frac{10^{-2}}{0{,}025} + \frac{4\times10^{-3}}{0{,}8} \ \text{K}\cdot\text{W}^{-1}$$

$$= 0{,}41 \ \text{K}\cdot\text{W}^{-1}$$

?

F Remdamiesi šiluminės varžos formule patikrinkite, ar teisingi vienetai K · W⁻¹.

Viengubo stiklo langui šiluminė varža bus 0,005 $K \cdot W^{-1}$, bet atminkite, kad vyks konvekcija oro tarpe. Skyriaus pabaigos užduotis leis jums patyrinėti stiklo naudojimą šiuolaikiniuose languose.

Žr. 3 ir 4 klausimus. ■

U vertės

U vertės yra dydžiai, kuriuos naudoja architektai ir šildymo sistemų inžinieriai, nagrinėdami pastatų šiluminės energijos srautus, konkrečiai, energijos nuostolius pro langus ir sienas. Tam tikro medžiagos storio *U* vertė yra jos **šiluminis skaidrumas,** t. y. šiluminės energijos srautas pro tą medžiagą, tenkantis vienetiniam plotui, esant vieno laipsnio temperatūrų skirtumui. Vadinasi, jis gaunamas iš sąryšio:

$$U \text{ vertė} = \frac{\text{energijos srauto sparta}}{\text{plotas} \times \text{temperatūrų skirtumas}}$$

Jos vienetai yra $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. *U* vertės turimos įvairių rūšių sienoms, langams, grindims ir stogams. Tos vertės buvo gautos *tiesiogiai matuojant*, o ne teoriškai skaičiuojant. Taigi šiluminio skaidrumo vertės yra realistiškesnės už šiluminio laidumo vertes, kadangi jose atsižvelgiama į tikrąją statybinės medžiagos sudėtį ir įskaitoma elementuose su tuštumomis galinti vykti konvekcija.

Žr. 5 klausimą. ■

Kambario arba pastato šiluminis skaidrumas gali būti apskaičiuojamas padauginus kiekvieno paviršiaus sandaros elemento *U* vertę iš atitinkamo ploto.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėtumėte mokėti:

- Aptarti darbo ir energijos ekvivalentumą, o konkrečiai, darbo ir šiluminės energijos, reikalingos medžiagai sušildyti, ekvivalentumą.
- Apibūdinti šiluminės energijos perdavimo procesus: laidumą, konvekciją ir spinduliavimą.
- Nurodyti skirtingų temperatūros matavimo metodų privalumus ir trūkumus.
- Apibūdinti skirtumus tarp trijų temperatūros skalių: termodinaminės (absoliutinės arba Kelvino), šimtalaipsnės ir Celsijaus.
- Paaiškinti terminus: šiluminė talpa, savitoji šiluma, šiluminis laidumas ir *U* vertės.
- Atlikti kūnų temperatūros pokyčio skaičiavimus, panaudojant šiluminę talpą arba savitąją šilumą.
- Apskaičiuoti šiluminę varžą, panaudojant t/kA vienam sluoksniui ir $\Sigma(t/kA)$ keletui sluoksnių.
- Panaudoti šiluminį skaidrumą (arba *U* vertes) šiluminės energijos srautui pro medžiagas skaičiuoti.

KLAUSIMAI

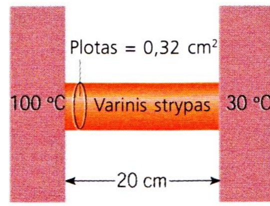
1 Metalo luitas, kurio masė 103 g, yra kaitinamas iki 100 °C, po to perkeliamas į polistireno menzūrą su 200 g 19,8 °C vandens. Kai pasiekiama šiluminė pusiausvyra, vanduo yra 21,6 °C.

a) Apskaičiuokite: **(i)** energiją, vandens gautą šio proceso metu, ir **(ii)** metalo savitąją šilumą.

b) Aprašytasis eksperimentas nelabai tinka metalo savitajai šilumai matuoti.
(i) Paminėkite du svarbius klaidų šaltinius.
(ii) Nurodykite būdą vienam iš jų sumažinti.

Vandens savitoji šiluma yra 4,20 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

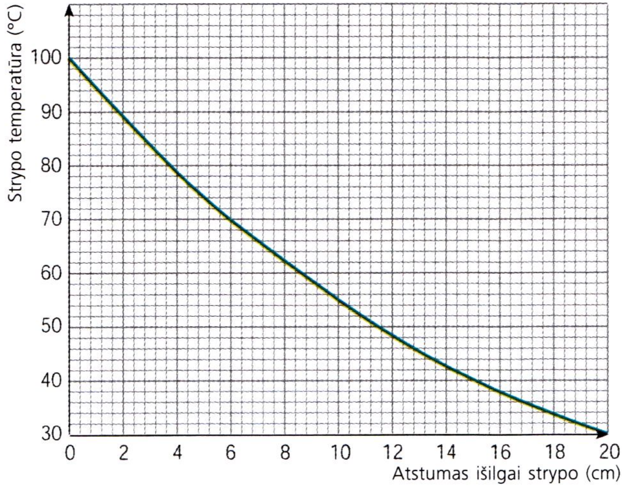
2 14.K2a) pav. atvaizduotas neizoliuotas varinis strypas, 20 cm ilgio ir 0,32 cm² skerspjūvio ploto. Palaikomos pastovios to strypo galų temperatūros, 100 °C ir 30 °C.



14.K2a) pav.

Vario šiluminis laidumas = 109 W · m⁻¹ · K⁻¹.

14.K2b) pav. atvaizduota strypo temperatūra įvairiais atstumais nuo karštojo galo po to, kai temperatūra nusistovi.

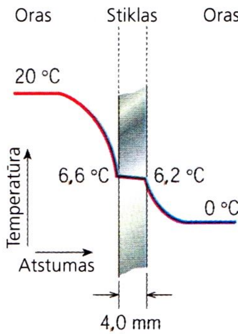


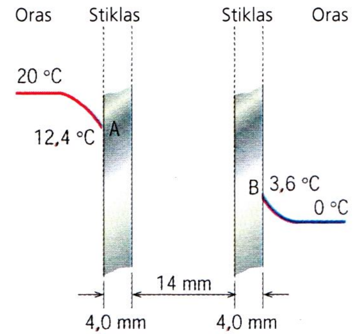
14.K2b) pav.

a) Nustatykite iš grafiko temperatūros gradientą ties karštuoju strypo galu. Apskaičiuokite šilumos srauto į karštąjį strypo galą spartą.
b) Iš grafiko raskite temperatūros gradientą ties vėsiuoju strypo galu. Apskaičiuokite šilumos srauto pro šaltąjį strypo galą spartą.
c) Kokia yra šilumos nuostolių pro strypo šonus sparta?
d) Pasakykite, nurodydami kiekvienu atveju vieną priežastį, ar kiekvienas iš šių penkių dydžių būtų didesnis, ar mažesnis, jei strypas būtų visiškai izoliuotas.

3 Šildymo sistemų inžinierius paliko nebaigęs dalį skaičiavimų apie energijos nuostolius dėl šiluminio laidumo pro vienetinį viengubo ir dvigubo stiklo, kurio storis 4,0 mm, plotą. Jums reikia juos užbaigti, atsakant į žemiau pateikiamus klausimus. Inžinierius jau pavaizdavo temperatūros gradientus ore šalia vidinio ir išorinio stiklo paviršių.

a) Viengubo stiklo lango 14.K3a) pav. perduodama energija yra 100 W · m⁻². Parodykite, kad stiklo šiluminis laidumas yra 1,0 W · m⁻¹ · K⁻¹.
b) **(i)** Apskaičiuokite temperatūras ties dvigubo lango oro tarpo (vidiniais) paviršiais, 14.K3b) pav. Dvigubo stiklo langų energijos perdavimas yra 60 W · m⁻².





14.K3 pav.

(ii) Užbaikite 14.K3b) pav., nubrėždami tinkamą liniją tarp A ir B, ir pažymėkite jūsų ką tik suskaičiuotas temperatūras, kad būtų parodytas gradientas tarp šių taškų.
c) Įrodykite, kad 14 mm pločio oro tarpas dvigubo stiklo lange atstoja 0,10 W · m⁻¹ · K⁻¹ laidininką.
d) Šiluminis oro laidumas iš tikrųjų yra 0,024 W · m⁻¹ · K⁻¹. Pateikite priežastį, dėl ko ta vertė oro tarpui yra šitiek daug didesnė.

4 Namo pirmasis aukštas yra 50 m² ploto. Ant grindų patiestas 15 mm storio kilimas, kuris visiškai dengia grindis. Kilimas guli ant betono sluoksnio, kurio storis 200 mm. Viršutinio kilimo paviršiaus temperatūra 15 °C, o apatinio betono paviršiaus temperatūra 10 °C.

Šiluminis betono laidumas = 0,75 W · m⁻¹ · K⁻¹; kilimo medžiagos šiluminis laidumas = 0,06 W · m⁻¹ · K⁻¹.

a) Apskaičiuokite spartą, kuria vyks energijos perdavimas be kilimo, laikydami temperatūrą ties viršutiniu ir apatiniu betono paviršiais atitinkamai lygia 15 °C ir 10 °C.
b) Apskaičiuokite temperatūrą ties kilimo ir betono riba.
c) Apskaičiuokite energijos perdavimo spartą su kilimu.

5 Pasinaudodami 14.2 lentelės duomenimis, apskaičiuokite šių kūnų U vertes:

a) Plytos, kurios šono plotas 17,8 cm × 11,4 cm, storis 7,6 cm.
b) Betoninės sijos, kurios šono plotas 3,00 m × 0,15 m, storis 0,12 m.
c) Medinės plokštės, kurios plotas 5,0 m × 3,5 m, storis 8 mm (imkite vidutinę šiluminio laidumo vertę).

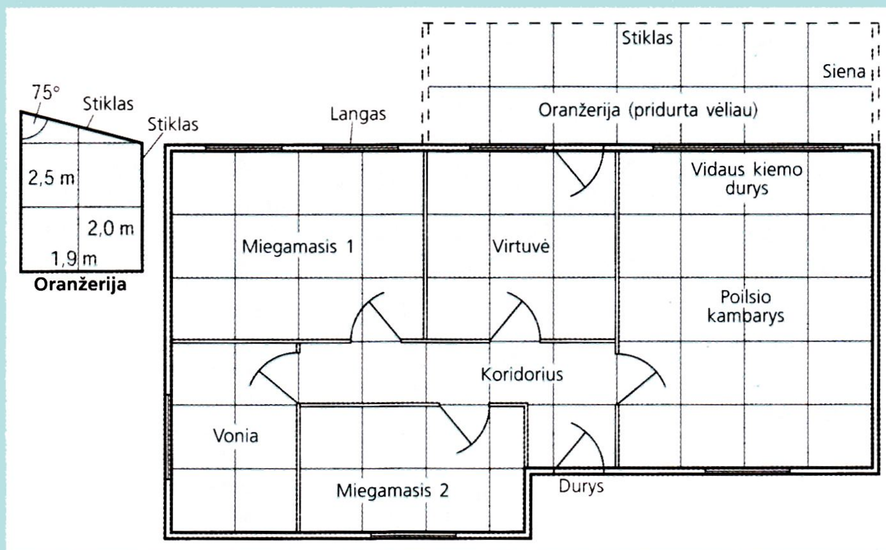
Skyriaus schemą, aprašančią 14 ir 15 skyrius, rasite 336 puslapyje

Užduotis

ŠILUMOS NUOSTOLIAI IR GAVIMAS BŪSTE

Šildymo sąskaitos sudaro dideles išlaidas daugumai gyventojų, ir žmonės dažnai svarsto, ar neapsimokėtų įsistatyti dvigubus langus. Šiame pratime apskaičiuosime namo šiluminės energijos nuostolius. 14.U1 pav. yra nedidelio vieno aukšto namo planas, o 14.U1 lentelėje pateikti jo sienų, langų ir durų matmenys. Kitus matmenis imkite iš plano, sužymėto 1 metro kraštinės kvadratais.

14.U1 pav. **Vieno aukšto namo planas ir oranžerijos vertikalioji projekcija (tinklelis – 1 metro kraštinės kvadratai)**



14.U1 lentelė.
Matmenys metrais

	Aukštis	Plotis
Visos sienos	2,50	(kaip plane)
Langai	1,25	1,20
Durys	2,00	0,75
Stiklinės vidinio kiemo durys	2,00	3,00

U vertės

14.U2 lentelėje pateiktos stiklo ir kitų medžiagų, panaudotų vienaukščiame name, *U* vertės.

14.U2 lentelė. **Medžiagų *U* vertės, W · m^{-1} · K^{-1}, panaudotoms medžiagoms**

Stiklai	Viengubas stiklas	5,4
	Dvigubas stiklas	2,8
	Aukštos kokybės dvigubas stiklas: „Saulvėsis K"	1,9
Kitos medžiagos	Izoliuotos išorinės korėtos sienos	0,51
	Vidinės sienos	3,50
	Durys	5,20
	Grindys	0,60
	Izoliuotos lubos	0,35

U vertės nusako energijos srauto spartą pro medžiagos kvadratinį metrą 1 K (1 °C) temperatūrų skirtumui tarp paviršių. Duotajai medžiagai energijos srautą vatais gauname iš sąryšio

U vertė × plotas × temperatūrų skirtumas per visą storį

Atkreipkite dėmesį, kad *U* vertės pateikiamos konkretiems medžiagų storiams.

Šilumos nuostoliai iš vienaukščio namo be oranžerijos

Vienaukščio namelio langai ir vidinio kiemo durys yra viengubo stiklo. Šiame etape jis yra be oranžerijos.

1

a) Apskaičiuokite visą stiklo (langų ir vidinio kiemo durų), dviejų išorinių durų, korėtų sienų, grindų ir lubų plotą.

b) Iš to gaukite energijos nuostolių (vatais) į 5 °C išorę spartą, kai visuose kambariuose yra 20 °C, ir apskaičiuokite atskirai nuostolius pro langus, išorines duris, sienas, grindis ir lubas. Kurie nuostoliai didžiausi?

c) Pasakykite, ar namelį galima būtų apšildyti:
(i) tipišku nedideliu centrinio šildymo katilu su radiatoriais, tiekiančiais 40 000 Britanijos šiluminių vienetų; 1 BŠV = 0,293 W (nors dalis energijos prarandama tiesiog pro ventiliacijos vamzdžius);
(ii) elektriniais šildytuvais, kurių kiekvienas tiektų 2 kW.

d) Iš naujo apskaičiuokite energijos nuostolius su viengubais ir su aukštos kokybės dvigubais langais (pasikeis tik nuostoliai pro langus ir vidinio kiemo duris).

e) Apskaičiuokite namelio šildymo 1 valandos kainą
(i) su viengubais stiklais ir
(ii) su aukštos kokybės dvigubais stiklais. Energijos kaina yra 8 pensai už kilovatvalandę.

Vienaukštis namelis šildomas po 15 valandų per dieną 90 dienų per metus, esant toms pačioms vidutinėms sąlygoms. Palyginkite metines išlaidas su tais dviejų tipų stiklais.

f) Dvigubi stiklai brangesni už viengubus. Norint sutaupyti apie 100 svarų sterlingų per metus už šildymą, pasakykite, ar verta:
(i) įstatyti dvigubus langus, kai namelis statomas;
(ii) pakeisti gana naujus viengubo stiklo langus dvigubais langais.
(Įvertinkite arba sužinokite langų ir jų pakeitimo kainas.)

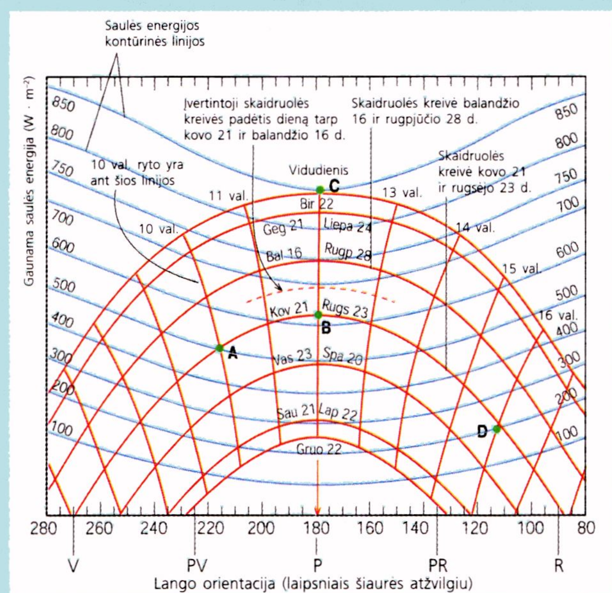
Saulės energija, gaunama oranžerijos

Savininkas namo gale priduria oranžeriją, kaip pavaizduota plane, su stogu ir ilga stikline siena. Toliau skaičiuosime energiją, gautą pro stogą. (Panašiai būtų skaičiuojama ir stiklinei sienai.)

Inžinieriai naudojasi **kontūrinėmis diagramomis** ir **skaidruolėmis**, įvertindami saulės kaitinimą. Saulės energija, kurią sugeria pastatas, priklauso nuo jo geografinės padėties (taip pat ir platumos), jo orientacijos į Š ir P, jo matmenų ir medžiagų. Kontūrinėse diagramose ir skaidruolėse atsižvelgiama į šiuos veiksnius. Jose atsižvelgiama ir į tiesioginius saulės spindulius, ir išsklaidytą spinduliavimą iš dangaus bei spinduliavimą, atspindėtą nuo žemės. Daug skaičiavimų tenka atlikti, gaunant kiekvienos veiksnių aibės kreives.

14.U2 pav. mėlynos kontūrų linijos atitinka energijos gavimą pro oranžerijos stogą, o raudonos skaidruolės linijos yra skirtingiems dienos ir metų laikams 52° šiaurės platumoje (apytikslėje Milton Keynes platumoje) (55° – apytikslėje Širvintų platumoje, – *vert.*). Energija apskaičiuota 75° nuožulnumo (su vertikale) stogui.

Kadangi oranžerija nukreipta į pietus, skaidruolė orientuojama pagal Saulės maksimalų aukštį (vidurdienį), pietų kryptimi. Kontūrai nubraižyti visiškai skaidriam stiklui su šešėlio koeficientu 1,0.



14.U2 pav. Kontūrinis brėžinys (mėlynai) ir skaidruolė (raudonai) 75° nuožulnumo stogui ant į pietus nukreiptos oranžerijos 52° šiaurės platumoje

Galite rasti gaunamą energiją iš kontūrinės diagramos. Pavyzdžiui, taške **A** kovo 21 dieną 10 valandą ryto gaunama saulės energija, jei stiklas viengubas, yra 500 W · m⁻².

2

a) Kokia yra vieno kvadratinio metro gaunama saulės energija taške **B** (tos pačios dienos vidudienį)?

Gaunamos saulės energijos vertės gali būti koreguojamos priklausomai nuo stiklo rūšies ar stiklo su žaliuzėmis **šešėlio koeficiento.** 14.U3 lentelėje išvardinti šešėlio koeficientai keletu galimų atvejų. Pavyzdžiui, viengubam stiklui su šešėlio koeficientu 0,95 šildymas 10 val. ryto kovo 21 d. bus toks:

$$500 \times 0{,}95\ \mathrm{W \cdot m^{-2}} = 475\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}.$$

14.U3 lentelė. Šešėlio koeficientai, be žaliuzių ir su jomis

	Be žaliuzių	Su žaliuzėmis
Viengubas stiklas (6 mm storio)	0,95	0,55
Dvigubas stiklas	0,53	0,50
Dvigubas stiklas „Saulvėsis K“	0,30	0,29

b) Palyginkite maksimalią gaunamą saulės energiją vienam metrui pro oranžerijos stogą vidudienį birželio 22, taške C, esant **(i)** viengubam stiklui, **(ii)** „Saulvėsis K“ dvigubam stiklui su žaliuzėmis.

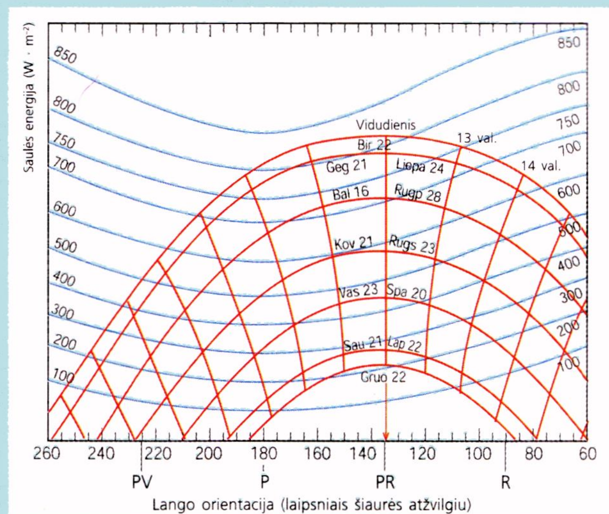
Gaunamos energijos yra proporcingos šešėlio koeficientui, taigi bus tarp šių verčių.

c) Kokios yra atitinkamos gaunamos energijos 4 valandą popiet paskutinės rugsėjo savaitės pabaigoje, **D**? Palyginkite jūsų vertes su vertėmis birželio 22 d., **b)** atveju.

d) Apskaičiuokite šiluminius nuostolius vienam kvadratiniam metrui pro stiklinį stogą, kai temperatūrų skirtumas tarp vidaus ir išorės yra 20 °C.

Palyginkite savo atsakymą su šildymo vertėmis **b)** atveju, ir numatykite, ko galima tikėtis birželio vidudienį oranžerijoje. (Atkreipkite dėmesį, kad vertikali stiklinė siena irgi prisideda prie energijos gavimo ir nuostolių.)

Už kelio posūkio stovi toks pat vienaukštis namas. Jis nukreiptas į pietryčius ir turi tokią pačią oranžeriją. 14.U3 pav. vaizduoja paslinktą skaidruolę, atsižvelgiant į pakitusią kryptį. Savininkas teišgali įsirengti viengubo stiklo langus be žaliuzių.



14.U3 pav. Kontūrinis planas ir skaidruolė 75° nuožulnumo stogui ant į pietryčius nukreiptos oranžerijos 52° šiaurės platumoje

e) Apskaičiuokite gaunamą saulės energiją pro šį stogą birželio 22 d. Palyginkite ją su vertėmis iš **b)** atvejo pirmajai oranžerijai.

15 Termodinamikos dėsniai



Profesorius Džordžas Piketas (*Pickett*) su kriostatu, kuriuo naudojasi ultražemoms temperatūroms pasiekti. 1993 metais jis ir jo komanda atšaldė vario gabalėlį iki septynių milijonųjų laipsnio virš 0 K.

DABAR JAU nemažai laiko būsite praleidę, besimokydami apie medžiagų savybes: laidininkai turi varžą, skysčiai yra klampūs, ir pan.

Tačiau negalime būti tikri, kad tokios pat savybės bus labai žemose temperatūrose. Pavyzdžiui, esant 4 K, gyvsidabris praranda visą savo varžą ir srovė gali tekėti juo visą amžinybę nė kiek nemažėdama. Esant labai žemoms temperatūroms, helis virsta skysčiu, kuris praranda savo klampumą ir gali laisvai tekėti. Deguonis netgi tampa magnetiniu.

Mokslininkai dirba, stengdamiesi pasiekti vis žemesnes temperatūras ir atrasti dar nepaprastesnes vis platesnio medžiagų spektro savybes.

Absoliutinio nulio temperatūra yra apibrėžta kaip 0 K (apie –273,16 °C), kai vienintelė išliekanti energija yra „nulinio taško“ energija, apibūdinama remiantis vadinamuoju neapibrėžtumo principu ir visada egzistuojanti. Be to, žinome, kad niekada negalėsime pasiekti absoliutinio nulio. Tačiau tai nesulaiko mokslininkų nuo pastangų priartėti prie jo kiek įmanoma arčiau. Šalčiausia temperatūra, pasiekta iki 1995 metų, buvo tik 200 milijardųjų vieno laipsnio virš nulio dalių (1995 m. pasiekta žemesnė nei 100 milijardųjų kelvino dalių temperatūra – ***vert. past.*****), – netgi kosmoso temperatūra yra „tik“ apie –270 °C. Taip arti, tačiau taip toli!**

Įžanga

Vos sužinoję apie absoliutinio nulio temperatūrą, fizikai stengėsi ją pasiekti. Tai yra termodinamikos problema, būtent, energijos perdavimo procesų, tarp jų darbo ir šildymo, tyrinėjimas ir tai, kaip šie du procesai susiję.

Tačiau termodinamika yra kur kas daugiau, nei pastangos pasiekti absoliutinį nulį. Termodinamika paaiškina, kodėl galime sušildyti ir išplėsti dujas, kuriomis varomi vidaus degimo varikliai, – dauguma transporto priemonių pagrįstos vienokia ar kitokia termodinaminio (šiluminio) variklio forma. Ji paaiškina energijos perdavimo ribas ir parodo, pavyzdžiui, kad niekaip negalime sukonstruoti visiškai efektyvios jėgainės elektrai tiekti. Buityje termodinamika aiškina šaldytuvų ir kitų mums talkinančių prietaisų veikimą.

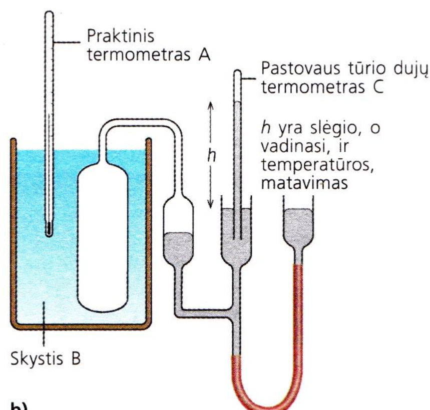
1 NULINIS DĖSNIS

Kai fizikai tik pradėjo tyrinėti termodinamiką, jie nustatė tris dėsnius. Visai logiškai jie pavadino tuos dėsnius pirmuoju, antruoju ir trečiuoju termodinamikos dėsniais. Tačiau XX amžiaus 4-ame dešimtmetyje jie suprato, kad egzistuoja daug svarbesnis fundamentalus dėsnis nei šie, ir, užuot pakeitę tų pavadinimus, jie pavadino naująjį dėsnį **nuliniu termodinamikos dėsniu.** Jis teigia:

Jei du kūnai yra termodinaminėje pusiausvyroje su trečiuoju kūnu, tai jie turi būti termodinaminėje pusiausvyroje ir vienas su kitu.

Jei du ar daugiau kūnų yra tokio pobūdžio pusiausvyroje, kaip 15.1a) pav., tai ir jų temperatūra turi būti tokia pat, kadangi šiluminė energija neperduodama tarp kūnų, kurie yra tos pačios temperatūros. Kaip matėme ankstesniame skyriuje, kad energija būtų perduota šiluminiu būdu, reikalingas *temperatūros gradientas*. Be nulinio dėsnio praktinis termometras būtų neįmanomas.

Pasinaudokime nuliniu dėsniu, kalibruodami termometrą. Praktinis termometras (imkime gyvsidabrio termometrą) ir dujinis termometras patalpinami į skystį ar panašią šiluminės energijos talpyklą, kaip 15.1b) pav. Dujinis termometras yra „idealus" termometras, naudojamas temperatūrai apibrėžti (žr. 156 p.). Abu termometrai pasiekia šiluminę pusiausvyrą su skysčiu. Tada abudu termometrai yra pusiausvyroje ir vienas su kitu, taigi yra tos pačios temperatūros. Tai reiškia, kad praktinis termometras gali būti kalibruojamas dujinio termometro atžvilgiu tam tikrai fiksuotai temperatūrai. Kiti taškai gali būti nustatomi keičiant skysčio temperatūrą, kuri išmatuojama naudojant dujinį termometrą.



- Praktinis termometras yra šiluminėje pusiausvyroje su skysčiu
- Dujinis termometras yra šiluminėje pusiausvyroje su skysčiu
- Todėl praktinis termometras ir dujinis termometras yra šiluminėje pusiausvyroje
- Termometrai rodys tą pačią temperatūrą

15.1 pav. **Iš nulinio dėsnio seka, kad praktinio termometro kalibravimas yra įmanomas**

2 PIRMASIS DĖSNIS

Jau žinome (61 ir 303 p.), kad Džaulis atrado, jog gali pakelti vandens temperatūrą, atlikdamas su juo darbą. Jis laikydavo vandenį termiškai izoliuotą nuo aplinkos, taigi jokia energija negalėjo būti šiluminiu būdu perduodama vandeniui iš išorės. Tačiau vidinė vandens energija pakisdavo.

Naudosime simbolį U **vidinei energijai** (matuojamai džauliais), ir vaizduosime mažą pokytį ΔU. Laikysime, kad nedidelis **darbas,** ΔW, atliekamas, kad sukeltų šį vidinės energijos pokytį. Taigi vidinės energijos pokytis džauliais yra

$$\Delta U = \Delta W$$

Kita vertus, vidinė vandens energija galėtų būti padidinta, leidžiant patekti iš išorės, paprastai šiluminio proceso (pvz., laidumo) būdu. Dažnai šią energiją vadiname „šiluma" arba „šilumine energija". Šį energijos kiekį (džauliais), patenkantį į vandenį, laikykime mažu dydžiu, ir pažymėkime jį ΔQ. Vidinės energijos pokytis

$$\Delta U = \Delta Q$$

Čia sakoma, kad neatliktas joks darbas.

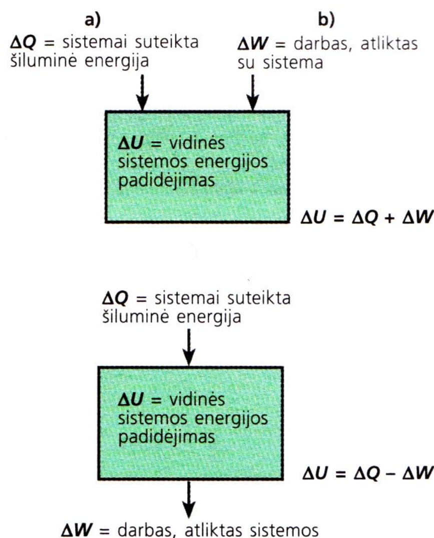
Tačiau dauguma kūno vidinės energijos pokyčių atsiranda tiek iš šiluminės, tiek ir mechaninės energijos ar darbo perdavimo kartu. Taigi bendriau užrašome taip:

$$\mathbf{\Delta U = \Delta Q + \Delta W}$$

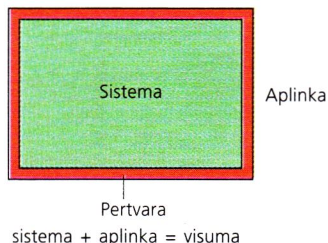
Galime panaudoti bet kokį šiluminės energijos ar mechaninės energijos (darbo) derinį, kad būtų gaunamas duotasis vidinės energijos pokytis ΔU. Ši lygtis yra **pirmojo termodinamikos dėsnio** algebrinė formuluotė. Galime suformuluoti šitą dėsnį žodžiais:

Sistemos vidinės energijos padidėjimas yra su sistema atlikto darbo ir sistemai šiluminiu būdu suteikto energijos kiekio suma.

Dėmesio! Mes nagrinėjame darbą, atliktą su vandeniu, todėl naudojame lygtyje *pliuso* ženklą. Kai kuriuose vadovėliuose minimas vandens atliekamas darbas, ir tada sąryšis užrašomas su minuso ženklu: $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$, kaip 15.2 pav.



15.2 pav. **Vidinės energijos padidėjimo išraišką užrašome skirtingai, priklausomai nuo to, ar nagrinėjame** a) **darbą, atliktą su sistema, ar** b) **darbą, atliktą sistemos**



15.3 pav. **Sistema, pertvara ir aplinka**

A Lengvaatletis suvalgo šokolado plytelę ir dalyvauja šuolių į aukštį rungtynėse. Apsakykite, kokios čia įvyksta energijos transformacijos, ir kaip patvirtinamas pirmasis dėsnis.

Mums tikriausiai lengviau įsiminti dėsnį lygties $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$ pavidalu. Atkreipkite dėmesį, kad, išreikšdami dėsnį žodžiais, nurodome **sistemą.** Mūsų pavyzdyje sistema yra vandens masė, kurios temperatūra buvo pakelta atliekant darbą arba šildant.

Kartais reikia nagrinėti, kas atsitiks daugiau nei vienam kūnui – gali prireikti nagrinėti keleto komponentų elgseną. Juos visus kartu vadinsime savo sistema, – galime sistemą laikyti esant apsuptą įsivaizduojamos pertvaros. Visi daiktai anapus šios pertvaros yra **aplinka.** Sistema ir aplinka, paimtos kartu, sudaro **visą** (15.3 pav.).

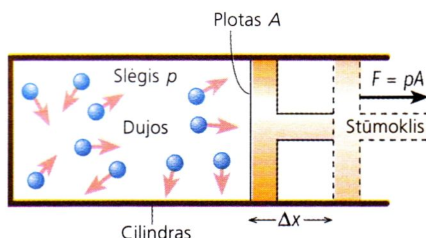
Nors energija gali būti įvairiais būdais pakeista, jos negalima sukurti ar sunaikinti. (Vėliau, 2-oje knygos dalyje, perskaitysite, kaip masė gali būti paversta energija ir kaip energija gali būti paversta mase. Šitai įmanoma tik esant branduolinėms sąveikoms; taip nebūna kasdienėje termodinamikoje.)

Žr. 1 klausimą. ■

Pirmojo dėsnio taikymas dujoms

Dauguma variklių naudoja dujas, kurios šildomos ir plečiasi, ir tų (atliekančių darbą) dujų pokyčiai vyksta cikliškai, iki dujos pagaliau atsiduria vėl tokiose pat sąlygose kaip ir pradedant ciklą. Panagrinėsime dujų plėtimąsi ir kitus pokyčius, apsiribodami *idealiomis* dujomis.

Kadangi tarp idealių dujų molekulių nėra traukos ar stūmos jėgų, vienintelis būdas, kuriuo vidinė energija ir dujų temperatūra gali keistis, yra molekulių kinetinės energijos pokytis. Dėl to idealių dujų sistemą nagrinėti lengviau nei daugelį kitų sistemų.



15.4 pav. **Dujų atliekamas darbas, judinant stūmoklį**

Žiūrėkime, kas atsitinka, kai darbą atlieka dujos. Tarkime, kad dujos yra cilindre su vienu uždaru galu. Kitame gale yra stūmoklis (15.4 pav.). Molekulės juda cilindro viduje, susidurdamos su sienelėmis, tampriai atsimušdamos nuo sienelių ir stūmoklio. Slėgis p veikia A ploto stūmoklį ir sukuria jėgą:

$$F = pA$$

Tarkime, kad dėl šios jėgos stūmoklis šiek tiek pajuda į išorę, taigi dujų tūris padidėja. Tada galime padaryti tokias prielaidas:

- Trintis tarp stūmoklio ir cilindro sienelių yra nykstamai maža.
- Jėga F, kuria veikia dujos, yra beveik tiksliai atsveriama išorinės jėgos F.
- Tačiau išorinė jėga labai nedaug tesumažėja.

B Išaiškinkite, kodėl turime daryti tas tris prielaidas.

Dėl šio nedidelio jėgų nesubalansavimo stūmoklis gali judėti. Tarkime, jis pasislenka nedideliu atstumu Δx, taigi yra nykstamai mažas dujų slėgio pokytis. Dujų tūris pasikeičia nedideliu kiekiu ΔV. Dujos atlieka darbą, išsiplėsdamos prieš išorinę jėgą. Todėl:

$$\text{darbas} = \text{jėga} \times \text{atstumas}$$

$$\Delta W = F\Delta x$$

$$= pA\Delta x$$

Sandauga $A\Delta x$ yra dujų tūrio padidėjimas ΔV. Taigi darbas, atliktas dujų, yra

$$\mathbf{\Delta W = p\Delta V}$$

Įsidėmėkite, kad jei nagrinėsime darbą, atliktą su dujomis, tai lygtyje reikės įrašyti minuso ženklą:

$$\Delta W = -p\Delta V$$

PAVYZDYS

K 52 mm skersmens cilindre su stūmokliu yra 2 atmosferų slėgio dujos. Apskaičiuokite darbą, kurį atlieka dujos, stumdamos stūmoklį iš cilindro nedideliu (palyginti su cilindro ilgiu) 3 mm atstumu. 1 atmosfera = 1,01 × 10⁵ Pa.

A Atliktas darbas = slėgis × tūrio pokytis = $pA\Delta x$

$= 2 \times 1{,}01 \times 10^5 \times [\pi \times (26 \times 10^{-3})^2 \times 3 \times 10^{-3}]$ J

$= 1{,}3$ J

Izoterminiai pokyčiai dujose

Kintant dujų bandinio tūriui, dažnai kinta ir slėgis. Nereta situacija, kai dujų tūris kinta, esant pastoviai temperatūrai, t. y. *izoterminėmis* sąlygomis. Tada galime pasinaudoti idealių dujų būvio lygtimi (žr. 156 p.):

$$pV = nRT,$$

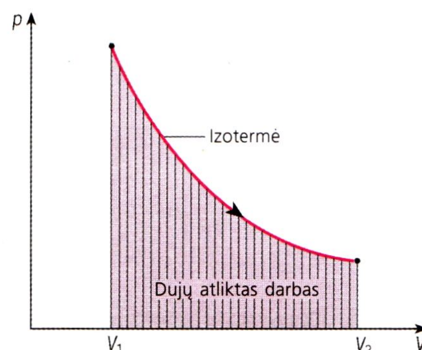
kur R yra dujų konstanta, o n yra molių skaičius bandinyje.

Galima sudaryti tokias (izotermines) bandymo sąlygas, lėtai keičiant tūrį ir tada dujos lieka šiluminėje pusiausvyroje (t. y. tos pačios temperatūros) su aplinka. Kai temperatūra pastovi, slėgio sąryšis su tūriu toks:

$$p = \frac{\text{const}}{V}$$

Ši atvirkštinė priklausomybė pavaizduota pV diagramoje 15.5 pav.

Kad rastume darbą, kurį atlieka besiplėsdamos dujos, nubraižome kreivę tikrosioms p ir V vertėms ir išmatuojame po ja esantį plotą. Atminkite: atliktas darbas = $p\Delta V$. Plotą gauname sudėję daug siaurų plotelių (kiekvienas jų $p\Delta V$), kurie sudaro visą plotą po kreive. Kita vertus, galima gauti atliktojo darbo matematinę išraišką. Tam nereikia skaičiuoti p verčių (žr. intarpą žemiau).



15.5 pav. **Idealių dujų *p* kitimas, kintant *V*, izoterminio plėtimosi metu. Plotas po kreive čia atitinka dujų atliktą darbą, džauliais**

■ Žr. 2 klausimą.

Dujų izoterminio plėtimosi metu atlikto darbo skaičiavimas

Kai tūris nedaug tepasikeičia, atliekamas darbas

$$\Delta W = p\Delta V \qquad [1]$$

Dar pasinaudojame idealių dujų lygtimi:

$$p = \frac{nRT}{V}$$

Įrašę ją vietoj p, iš 1 lygties gauname:

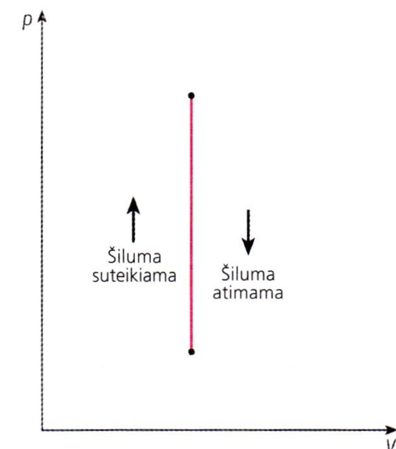
$$\Delta W = \frac{nRT}{V}\Delta V$$

Užuot sudėję ΔV plotelius, suintegruojame nuo pradinio tūrio V_1 iki galutinio tūrio V_2:

$$\Delta W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V}\,dV = nRT\int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{V}$$

Kadangi dV/V integralas yra ln V, gauname:

$$\Delta W = nRT(\ln V)_{v_1}^{v_2}$$
$$= nRT(\ln V_2 - \ln V_1)$$
$$= nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$$



15.6 pav. **Idealių dujų slėgio kitimas, esant pastoviam tūriui. Neatliekamas joks darbas, tačiau energija turi būti atimama šiluminiu būdu, kad slėgis sumažėtų, arba suteikiama, kad slėgis padidėtų**

Dujų slėgio kitimas, esant pastoviam tūriui

Užuot keitę dujų tūrį, esant pastoviam slėgiui, galėtume pabandyti pakeisti slėgį, kai tūris pastovus.

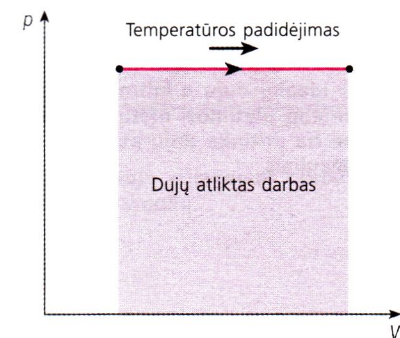
Tarkime, dujos yra inde su standžiomis sienelėmis, o keičiame temperatūrą, šildydami arba aušindami dujas. Kadangi tūris yra nekintamas, tai iš dujų lygties galime tikėtis, jog kai didės temperatūra, kils slėgis: dujų molekulių kinetinė energija didėja, jų impulsas didėja, jos smarkiau smūgiuoja, susidurdamos su sienelėmis, ir dėl to padidėja *slėgis* į sieneles.

Nors ir keičiame vidinę energiją, neatliekamas joks darbas. Tuo galime įsitikinti pažvelgę į 15.6 pav. pavaizduotą pV diagramą, kur tas pokytis vaizduojamas vertikalia linija: po šia linija nėra jokio ploto.

Kiek reikia energijos, kad dujų temperatūra pakiltų 1 kelvinu? Tas kiekis priklausys nuo konkretaus dujų kiekio. Paprastai imame vieną dujų molį ir remiamės **moline šiluma,** kuri yra energijos kiekis džauliais, reikalingas 1 moliui sušildyti 1 kelvinu. Ji žymima C_V.

Energijos kiekis, reikalingas dujų temperatūrą pakelti nedideliu kiekiu ΔT, yra $C_V\Delta T$. Indeksas V nurodo, kad tai yra **molinė šiluma, esant pastoviam tūriui.** Su dujomis neatliekamas joks darbas (jos nekeičia savo tūrio). Visa šiluminė energija Q_V, suteikta dujoms, tenka vidinės dujų energijos pakeitimui. 1 moliui dujų

$$\Delta U = \Delta Q_V = C_V\Delta T$$



15.7 pav. **Tūrio pokytis, esant pastoviam slėgiui. Dujų atliktas darbas yra plotas po atkarpa, vaizduojančia p = const. Dujų temperatūra turi būti didinama**

Dujų tūrio kitimas, esant pastoviam slėgiui

Taigi idealių dujų atliktas darbas, joms išsiplečiant nedideliu kiekiu ΔV, yra $p\Delta V$. Jei išsiplėtimas didelis, vienintelis būdas slėgiui išlikti pastoviam (pagal dujų lygtį) yra kai didėja temperatūra. Iš pV diagramos 15.7 pav. aišku, kad atliktas darbas vis dar yra slėgis × tūrio pokytis, kadangi būtent toks yra plotas po horizontalia atkarpa, vaizduojančia šį pokytį.

Taip pat turime sugebėti apskaičiuoti, kiek padidėja vidinė energija. Šį kartą imame **molinę šilumą, esant pastoviam slėgiui** – C_p. Ji apibrėžiama kaip energijos kiekis džauliais, reikalingas 1 moliui dujų pašildyti 1 kelvinu, esant pastoviam slėgiui. Dujų molinės šilumos esant pastoviam slėgiui ir esant pastoviam tūriui nevienodos. Kai idealios dujos šildomos, esant pastoviam slėgiui, jų tūris padidėja. Jos turi atlikti darbą, kad įveiktų aplinkos poveikį, taip pat turi padidinti savo vidinę energiją (molekulių kinetinę energiją). Dėl to tikėtina, kad molinė šiluma, esant pastoviam slėgiui, bus didesnė, nei esant pastoviam tūriui. Aptariant tai 323 p. aiškinama, kiek ji bus didesnė idealioms dujoms. Skysčiams ir kietiems kūnams skirtumas labai mažas, nes jie, šildomi esant pastoviam slėgiui, labai nedaug tesiplečia.

?

C Pasinaudokite idealių dujų būvio lygtimi ir įrodykite, kad dujų temperatūra turi didėti, kad slėgis liktų pastovus, kai didėja jų tūris. Užsiminkite, kodėl taip yra.

Idealių dujų molinių šilumų apžvalga

Tarkime, kad Q_V yra šiluminė energija, suteikiama pastovaus tūrio idealioms dujoms, Q_P – šiluminė energija, suteikiama esant pastoviam slėgiui, o ΔT yra temperatūros pokytis kiekvienu atveju. Tada n molių dujų

$$\Delta Q_V = nC_V\Delta T, \text{ o } \Delta Q_P = nC_P\Delta T$$

Tai yra,

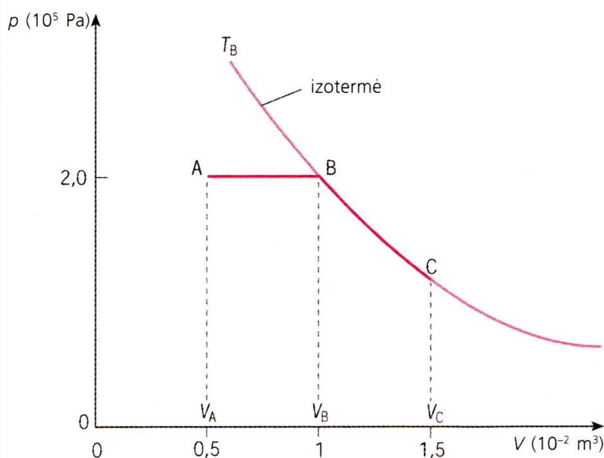
$$\boldsymbol{C_V = \frac{\Delta Q_V}{n\Delta T}}, \text{ o } \boldsymbol{C_P = \frac{\Delta Q_P}{n\Delta T}}.$$

PAVYZDYS

Dviejų pakopų procesas: izobarinis ir izoterminis pokytis

K Inde yra 0,5 mol idealių dujų, su kuriomis vyksta izobarinis (pastovaus slėgio) pokytis AB, po to vyksta izoterminis (pastovios temperatūros) pokytis BC, kaip vaizduojama 15.8 pav. Ties A dujų slėgis yra $2{,}0 \times 10^5$ Pa (2 atmosferos), o tūris – $5{,}0 \times 10^{-3}$ m^3 (5 litrai). Dujų tūris pakinta iki $1{,}0 \times 10^{-2}$ m^3 ties B ir iki $1{,}5 \times 10^{-2}$ m^3 ties C.

Apskaičiuokite dujų atliktą darbą.



15.8 pav. **Dviejų pakopų proceso (izobarinio ir izoterminio pokyčio) *pV* diagrama**

A Pakopa AB

Dujų atliktas darbas W_{AB} bus plotas po atkarpa AB:

$$W_{AB} = \text{slėgis (pastovus)} \times \text{tūrio pokytis}$$

$$2{,}0 \times 10^5 \times (1{,}0 - 0{,}5) \times 10^{-2}\ \text{J} = 1000\ \text{J}$$

Temperatūra T izotermėje

Turime žinoti temperatūrą T_A ties A, kad rastume temperatūrą T_B ties B.

$T_A = p_A V_A / nR = 2{,}0 \times 10^5 \times 5{,}0 \times 10^{-3}/(0{,}5 \times 8{,}31) = 240$ K

Ties B tūris yra dvigubai didesnis, kadangi slėgis išlieka pastovus, ir temperatūra padvigubėja iki 2 T_A, t. y. 480 K.

Pakopa BC

Plotą po BC apskaičiuosime šitaip: arba nubraižysime brėžinį ir rasime plotą po kreive, arba naudosimės matematine analize. Pasinaudokime analize:

$$W_{BC} = \int_{V_B}^{V_C} p\mathrm{d}V = nRT\int_{V_B}^{V_C} \frac{\mathrm{d}V}{V} = nRT\ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$$

$$= 0{,}50 \times 8{,}31 \times 480 \times \ln\left(\frac{1{,}5\times10^{-2}}{1{,}0\times10^{-2}}\right)\ \text{J}$$

$$= 1810\ \text{J}$$

Visas dujų atliktas darbas, joms plečiantis nuo A iki C, yra 1810 J.

Sąryšis tarp idealiųjų dujų C_V ir C_p

Galime pritaikyti pirmąjį termodinamikos dėsnį idealių dujų tūrio pokyčiui:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W = \Delta Q - p\Delta V,$$

kur $\Delta W = -p\Delta V$ – atliktas darbas, kuris yra teigiamas, kai darbas atliekamas su dujomis, ΔV yra neigiamas, kadangi tūris mažėja. Gauname dujų masės, esant pastoviam slėgiui, šiluminės energijos pokytį:

$$\Delta Q_p = \Delta U + p\Delta V$$

Bet žinome (žr. 322 p.), kad $\Delta U = \Delta Q_V$

Taigi $\Delta Q_p = \Delta Q_V + p\Delta V$

Dabar šiluminės energijos pokyčius, esant pastoviam slėgiui ir esant pastoviam tūriui, išreiškiame atitinkamomis savitosiomis šilumomis ir temperatūros pokyčiais. Tai padarome, kai yra n molių ir gauname:

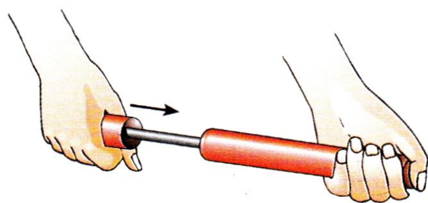
$$nC_p\Delta T = nC_V\Delta T + p\Delta V$$

Naudodamiesi idealių dujų būvio lygtimi, $pV = nRT$, ir pastovaus slėgio sąlyga, įrašome $nR\Delta T$ vietoje $p\Delta V$:

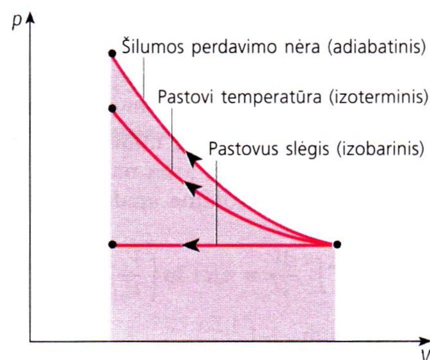
$$nC_p\Delta T = nC_V\Delta T + nR\Delta T$$

Abi puses padalijame iš $n\Delta T$ ir gauname $C_p = C_V + R$. Pertvarkę gauname:

$$\boldsymbol{C_p - C_V = R}$$



15.9 pav. **Staigus oro suslėgimas dviračio pompoje yra adiabatinio pokyčio pavyzdys**



15.10 pav. **Idealių dujų tūrio sumažėjimas, *pV* diagramoje pavaizduotas esant adiabatiniam, izoterminiam ir pastovaus slėgio pokyčiui**

Dujų tūrio pokytis be šiluminės energijos perdavimo – adiabatinis pokytis

Kai dujos slegiamos *labai sparčiai,* šiluminė energija nesuspėja palikti dujas šiluminio proceso būdu ir patekti į aplinką. Tačiau temperatūra pakinta, nes yra atliekamas darbas, – slegiant temperatūra didėja. Pokytį sukelia išorinė jėga, taigi bus slėgio padidėjimas. Šis spartus tūrio pokytis vadinamas **adiabatiniu** pokyčiu (nėra šiluminio energijos perdavimo). Toks atvejis priešingas labai lėtam suslėgimui, kai dujos išlieka pastovios temperatūros.

Dažnai pasitaikantis beveik adiabatinio proceso pavyzdys yra oro suslėgimas dviračio pompoje (15.9 pav.). Mechaninis darbas, atliktas suslegiant, padidina oro vidinę energiją, taigi pakyla jo temperatūra. Jei šitai atliekama labai greitai, energijai nėra laiko šiluminiu būdu pasklisti pro pompos sieneles.

Adiabatinis pokytis būna ir tada, kai dujos termiškai atskirtos nuo aplinkos izoliacine pertvara, kuri nepraleidžia jokios šilumos, kitaip nei izoterminiu atveju, kada dujos atskirtos sienele, kuri yra geras šiluminis energijos laidininkas.

Nulinis šilumos perdavimas yra griežtai apibrėžta būsena, todėl tai, kas atsitinka idealioms dujoms adiabatinio pokyčio metu, irgi yra apibrėžta. Taigi:

$$pV^{\gamma} = \text{konstanta},$$

kur γ yra idealių dujų pagrindinių savitųjų šilumų santykis, C_p/C_V. γ yra konstanta.

Ši lygtis atskleidžia svarbų sąryšį tarp p ir V pokyčio metu. Be to, ji gali būti panaudota su idealių dujų būvio lygtimi $pV = nRT$, taigi ji atskleidžia ir sąryšius tarp T ir p bei tarp T ir V pokyčio metu. Tai itin naudingas fizikos rezultatas, ir juo naudojasi fizikai praktikai, laikydami jį esant teisingu pagal apibrėžimą. Tačiau jei jus sudomintų jos matematinis išvedimas, tai kitame išplėstiniame intarpe rasite, kaip gauti tą lygtį.

Dabar esame išnagrinėję įvairius tūrio pokyčius, galinčius atsitikti idealioms dujoms: tūrio pokytį, kai pastovus slėgis, tūrio pokytį, kai pastovi temperatūra, ir tūrio pokytį, kai nėra šilumos perdavimo. Jie palyginami pV diagramoje 15.10 pav. pagal tūrio sumažėjimą, esant tam pačiam pradiniam tūriui. Adiabatiniai pokyčiai pV diagramose yra statesni už izoterminius pokyčius.

3 ANTRASIS DĖSNIS

Iš pirmojo dėsnio aišku, kad sistemos vidinės energijos pokytis susijęs su energijos, perduotos sistemai šiluminiu būdu, ir darbo, atlikto su sistema, suma. Sužinojome ir kaip darbas gali padidinti vidinę energiją.

Iki šiol vengėme aptarti, kaip paversti vidinę energiją darbu. Pasirodo, kad darbu galime paversti *dalį* energijos, *bet ne ją visą*. Iš to seka **antrasis termodinamikos dėsnis.** Viena iš kelių alternatyvių dėsnio formuluočių yra tokia:

Antrojo dėsnio 1 variantas

Neįmanoma šiluminei energijai būti perduotai iš aukštos temperatūros šaltinio taip, kad atliktas darbas būtų lygiavertis tam šiluminės energijos kiekiui.

Įrodymas, kad pV^{γ} = konstanta adiabatiniam pokyčiui

Vykstant adiabatiniam pokyčiui kinta ir slėgis, ir tūris, ir temperatūra. Pradėsime nuo idealių dujų būvio lygties: $pV = nRT$.

Toliau įvesime nedidelius pokyčius: slėgio – nuo p iki $(p + \Delta p)$, tūrio – nuo V iki $(V + \Delta V)$ ir temperatūros – nuo T iki $(T + \Delta T)$. Naujosios vertės irgi turi tenkinti dujų lygtį:

$$(p + \Delta p)(V + \Delta V) = nR(T + \Delta T)$$

Viską atskliaudę gauname:

$$pV + V\Delta p + p\Delta V + \Delta p\Delta V = nRT + nR\Delta T$$

pV ir nRT nariai priešingose lygties pusėse turi būti lygūs ir todėl gali būti suprastinti. $\Delta p\Delta V$ narys yra labai mažas, taigi galime jo nepaisyti. Tada:

$$V\Delta p + p\Delta V = nR\Delta T \qquad [1]$$

Dar nepanaudojome adiabatiškumo sąlygos $\Delta Q = 0$. Šitai padarome pirmojo dėsnio lygtyje $\Delta Q = \Delta U + p\Delta V$, ir gauname:

$$\Delta U = -p\Delta V$$

Bet $\Delta U = nC_V\Delta T$, todėl galime užrašyti:

$$nC_V\Delta T = -p\Delta V \qquad [2]$$

Intarpe 323 puslapyje buvo toks sąryšis: $nC_p\Delta T = nC_V\Delta T + nR\Delta T$. Dabar jis tampa

$$nC_p\Delta T = -p\Delta V + nR\Delta T \qquad [3]$$

Naudodamiesi 1 lygtimi, pakeičiame 3 lygties dešiniąją pusę ir gauname:

$$nC_p\Delta T = V\Delta p \qquad [4]$$

Tada pasinaudojame 2 ir 4 lygtimis ir randame santykį γ:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = -\frac{V\Delta p}{p\Delta V}$$

Pertvarkę gauname: $$\frac{\Delta p}{p} = -\gamma\frac{\Delta V}{V}$$

Suintegravę kiekvieną pusę, gauname:

$\ln p = -\gamma \ln V +$ integravimo konstanta,

arba $\ln p + \gamma \ln V =$ integravimo konstanta,

o atmetę logaritmus gauname:

$pV^{\gamma} =$ konstanta,

šitoji konstanta jau skiriasi nuo pirmykštės integravimo konstantos. Tačiau mus domina tik faktas, jog tai yra konstanta, o ne jos vertė.

Labai didelė yra šio antrojo dėsnio varianto pramoninė reikšmė. Anglis, dujos arba nafta yra deginami jėgainių boileriuose, siekiant gauti didelius šiluminės energijos kiekius. Ši energija pavirsta energija turbinų viduje, o pagaliau – energija, vartojama buityje. Neįmanoma visos kuro energijos turbinomis visiškai transformuoti į darbą.

Iš antrojo dėsnio išplaukia išvada, kad dalis energijos perduodama energijos talpyklai, kurios temperatūra žemesnė, negu boilerio temperatūra. Tokia talpykla gali būti aplinkos atmosfera arba vanduo aušinimo sistemoje, pavyzdžiui, upėje. Nėra būdo išvengti šio šiluminės energijos praradimo. Inžinieriai dėjo daugybę pastangų, konstruodami kaskart efektyvesnius variklius darbui atlikti, tačiau, kaip matysime, yra naudingumo koeficiento riba, kylanti iš antrojo dėsnio.

Yra antra svarbi alternatyvi dėsnio formuluotė:

Antrojo dėsnio 2 variantas

Neįmanoma įvykdyti energijos šiluminio perdavimo iš šaltesnio kūno šiltesniam, neatliekant darbo.

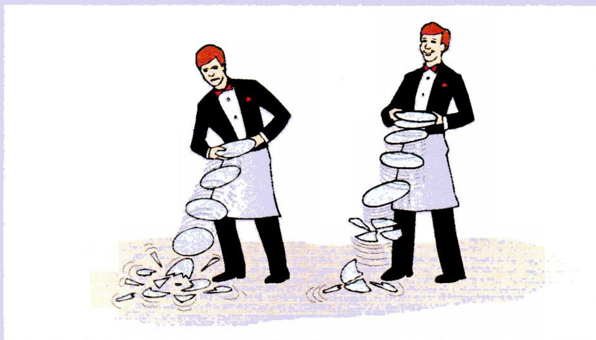
Jei dėsnis negaliotų, tai būtų labai paprasta imti šiluminę energiją iš daržo ir be jokio vargo vartoti ją namui šildyti žiemą. *Įmanoma* perduoti energiją iš šaltesnio kūno šiltesniam (arba energijos talpyklai), bet būtina atlikti tam tikrą darbą. Tai atlieka tiek šaldytuvai, tiek šilumos siurbliai.

■ Žr. 3 ir 6 klausimą.

Entropija – būdas netvarkai aprašyti

Antrasis dėsnis iš esmės apibūdina, kas darosi su Visata, taip pat laiko kryptį, ir yra susijęs su netvarkos matu, vadinamu **entropija.**

Kai persukinėjate vaizdajuostę į naują vietą juostoje, tai sukimo kryptį žinote netikrindami, ar spustelėjote sukimo į priekį, ar sukimo atgal mygtuką. Taip yra todėl, kad kai kurie įvykiai negali tikrovėje vykti priešinga kryptimi. Tai yra įvykiai, kuriuose įsigali netvarka. Pavyzdžiui, padavėjas numeta krūvą lėkščių, ir jos sudūžta: žinote, kad sudužusios lėkštės negali pakilti ir pasidaryti sveikos padavėjo rankose.



15.11 pav. **Kai kurie įvykiai tikrovėje atsitinka, o kai kurie – ne**

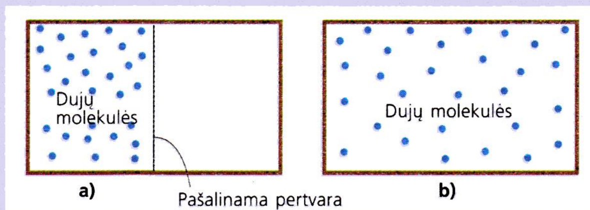
Vykstant Visatos evoliucijai, jos elementų tvarkingumas tolydžio mažėja. Antrąjį dėsnį galima išreikšti ir šitaip:

Antrojo dėsnio 3 variantas

Neįmanoma įvykdyti proceso, kuris mažintų Visatos entropijos visumą.

Iš kasdienės patirties žinome, kad vieni pokyčiai gali įvykti, o kiti – ne (15.11 pav.). Nagrinėdami molekulių išsidėstymą konteineryje, galėsime suprasti, kodėl kai kurie procesai yra tiek neįtikėtini, kad beveik neįmanomi. Pirma, įsivaizduokime keletą dujų molekulių, pertvaros laikomų vienoje indo pusėje. Tada pašaliname pertvarą ir žiūrime, kas atsitinka. Molekulės dideliu greičiu lakioja aplink ir labai greitai pasklinda po visą indą (15.12 pav.). Laboratorijoje galime šį efektą pademonstruoti su spalvotomis dujomis, pavyzdžiui, su bromu.

Lakiodamos molekulės vidutiniškai pusę laiko praleis vienoje indo pusėje, pusę – kitoje. Ir akivaizdu, kad nepaprastai maža tikimybė, jog visos molekulės vienu metu grįš į pradinę pusę. Pasinaudokime skaičiais, kad galėtume suprasti, kodėl taip yra:



15.12 pav. **Dujų molekulės vienoje konteinerio pusėje a) greitai pasklinda po visą konteinerį b), pašalinus pertvarą**

- Tarkime, pradedame tik nuo dešimties molekulių.
- Kai molekulėms buvo suteikta galimybė pasklisti, kiekviena molekulė turi 50% galimybę būti kairiojoje pusėje, t. y. tikimybę $\frac{1}{2}$.
- Tikimybė, kad visos molekulės būtų kairiojoje pusėje, yra

$$\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}, \text{ arba } \left(\frac{1}{2}\right)^{10}.$$

Tai yra 1 iš 1024 – nelabai tikėtinas įvykis, tačiau toks, kuris trumpam gali atsitikti, molekulėms laisvai lakiojant.

- Tačiau dabar tarkime, kad molekulių skaičių padidiname iki 10^{23} (mažiau, nei Avogadro skaičius). Ankščiau turėtą skaičių 10 pakeičiame 10^{23}. Tikimybė, kad molekulės bus kairiojoje pusėje, tampa

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{10^{23}}, \text{ arba 1 iš } 1024^{22} \text{ arba 1 iš } 1{,}7 \times 10^{66}.$$

(Kad parodytumėt, jog $1024^{22} = 1{,}7 \times 10^{66}$, naudokitės savo skaičiuoklių x^y klavišu.)

Vadinasi, galimybė, kad visos molekulės bus kairėje pusėje, tikrai yra labai maža:

- Tarkime, norime, kad visos molekulės būtų vienoje pusėje laiką t.
- Kad šitai įvyktų, turi būti laikas $1{,}7 \times 10^{66}\ t$, per kurį molekulės pasklidusios abiejose pusėse.
- Vidutiniškai turėtume laukti pusę šio laiko, iki atsitiks norima situacija.
- Taigi galime tikėtis, jog turėsime laukti $10^{66}\ t$ eilės laiką, kad visi atomai būtų kairėje pusėje.
- Vadinasi, kad visos molekulės išbūtų kairiojoje pusėje laiką t, lygų vienai mikrosekundei, turime laukti $(10^{66} \times 10^{-6})$ sekundžių, arba apytiksliai 10^{60} sekundžių. Tai yra daugiau nei 3×10^{52} metų, kas daugelį milijardų kartų ilgiau nei Visatos amžius.

Taip yra todėl, kad yra apytiksliai $1{,}7 \times 10^{66}$ būdų molekules išdėstyti dviejose konteinerio pusėse. Kad jos visos būtų kurioje nors vienoje pusėje, tėra vienas ypatingas išsidėstymas.

Sąryšis tarp entropijos ir išdėstymo būdų skaičiaus

Sakome, kad entropija yra būdų, kuriais sistema gali išsidėstyti, skaičiaus matas. Nors yra tik vienas būdas parinkti visas molekules, kad jos būtų vienoje pusėje, tačiau yra daug būdų išsirinkti pusę molekulių, kad jos būtų vienoje indo pusėje, paliekant likusias kitoje pusėje. Taigi pasiskirstymas, kai molekulės išsidėsčiusios abiejose pertvaros pusėse, turi didelę entropiją (daugybė būdų pasirinkti molekules), o visos molekulės vienoje pusėje turi mažą entropiją (vienas būdas). Šitai suprato Bolcmanas, o jo mintį daug vėliau išplėtojo Plankas. Tai buvo pavadinta Bolcmano ir Planko hipoteze, kuri išreiškiama taip:

$$S = k \ln W,$$

kur W yra skaičius būdų, kuriais gali būti sudaryti pasiskirstymai (pavyzdžiui, molekulių pasiskirstymai dėžėje), k yra Bolcmano konstanta, o S yra entropijos vertė, matuojama tais pačiais vienetais, kaip ir k (tai yra, $J \cdot K^{-1}$).

Sistemai tampant labiau netvarkia, padidėja skaičius būdų, kuriais gali išsidėstyti jos molekulės ar elementai; ta lygtis tiesiogiai parodo, kaip didėja entropija. Ilgainiui ši lygtis daug prisidėjo prie kvantinės teorijos, kuri aptariama 2-oje knygos dalyje (17 sk.).

?

D Įrodykite, kad $(1/2) \times 10^{23}$ yra tas pats, kas 1 iš 1024^{22}.

GYVYBĖ ŽEMĖJE IR ENTROPIJA

ŠIOJE VIETOJE galėtumėte paklausti apie tai, ką entropija reiškia biologinei gyvybei ir jos įvairovei. Pavyzdžiui, DNR yra labai sudėtinga, tvarką turinti biologinė molekulė, sudaryta iš atomų ir molekulių, kurie buvo labiau atsitiktinai išsidėstę. Atrodo, kad tai yra *priešingas* didėjančios entropijos proceso pavyzdys. Bet ar tai yra absoliučios neigiamos entropijos pavyzdys?



Žinoma, yra *vietinis* entropijos sumažėjimas, susidarant biologinės molekulės tvarkai. Tačiau entropinis antrojo dėsnio variantas aiškiai nurodo, kad turi būti absoliutus entropijos padidėjimas molekulės visatoje, – jos aplinkoje. Tai kurgi būtent yra tas laukiamas entropijos *padidėjimas,* – padidėjimas, turintis daugiau nei atsverti vietinį biologinį sumažėjimą?

Plačiu mastu, staigus entropijos didėjimas vyksta Saulėje, energijos šaltinyje, kuris palaiko Žemės gyvybę. Saulės branduolinės reakcijos pagamina milžiniškus šiluminės energijos kiekius atsitiktinai judančių dalelių ir spinduliavimo pavidalu. Imant siauresniu mastu, daug biologinių procesų susiję su aplinkos medžiagos irimu (sudėtingumo ir tvarkos mažėjimu) ir, šitaip atsitinkant, išskiria šiluminę energiją kaip gretutinį produktą.

Panašu, kad Saulė ir Žemė veikia kaip šiluminio variklio (kuris aptariamas vėliau) elementai. Lygiai kaip ir šiluminiame variklyje, gyvybės procesuose energija yra išsklaidoma, o absoliuti aplinkos entropija – padidinama.

?

E Paaiškinkite, kodėl gyvoji medžiaga negalėtų vystytis Žemėje be energijos šaltinio, atsiradusio susidarant Saulės sistemai.

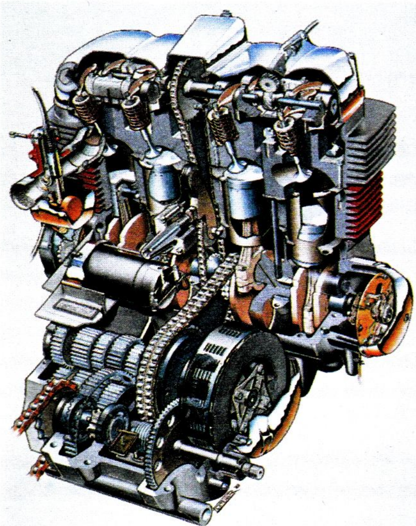
4 ŠILUMINIAI VARIKLIAI

Vidaus degimo variklis

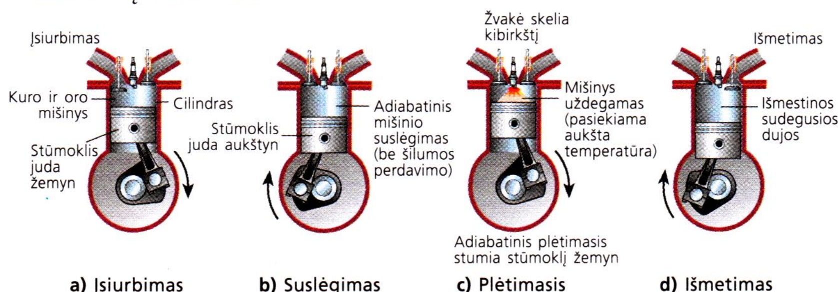
Varikliai konstruojami darbui atlikti. Vienas iš variklių, su kuriais dažniausiai susiduriame, yra automobilio variklis, naudojantis šiluminę energiją, gaunamą degant benzinui (15.13 pav.). Jis vadinamas **vidaus degimo varikliu.**

Oras ir kuras sumaišomi įsiurbimo takto metu (15.14 pav.). Po to, kai įsiurbimo vožtuvas užsidaro, oro ir kuro mišinys suslegiamas, stūmokliui judant šio ciklo suspaudimo takte. Kibirkštinė žvakė uždega šį mišinį, ir dėl to įvyksta plėtimasis, kuris yra ciklo dalis, teikianti energiją. Ir pagaliau, suvartotos dujos išstumiamos pro variklio išmetamąjį vamzdį.

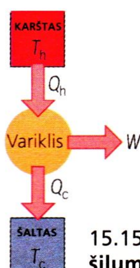
Judėjimas palaikomas, sujungus keletą stūmoklių, esančių skirtingose ciklo stadijose. Stūmoklių judėjimas tiesia linija paverčiamas ratų sukimusi.



15.13 pav. ***Honda 750cc*** **motociklo variklis – vidaus degimo variklio pavyzdys**



15.14 pav. **Vidaus degimo variklis. Stūmoklio judėjimas aukštyn ir žemyn paverčiamas sukimusi automobiliui varyti**



$$\text{Naudingumo koeficientas} = \frac{W}{Q_h} \times 100\% = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \times 100\%$$

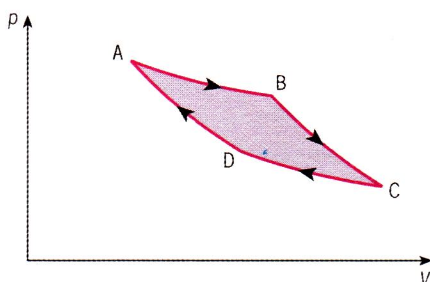
15.15 pav. **Energijos perdavimo šiluminiame variklyje diagrama**

Vidinė variklio energija ciklo pabaigoje yra nepakitusi, lyginant su ciklo pradžia. Tačiau energija prarandama į aplinką bei su išmetamosiomis dujomis. Taigi šiluminiu būdu suteiktoji energija, uždegant benziną, lygi atliktam darbui ir šiluminiams nuostoliams, šildantiems aplinką.

Jei Q_h = suteikiama „šiluma“ (karštas šaltinis), W = atliktas darbas, o Q_c = atiduodama „šiluma“ (šilumos nuostoliai; šaltas nuotakas), tai

$$Q_h = W + Q_c$$

Per vieną ciklą atliktas darbas lygus iš tikrųjų suvartotos energijos kiekiui. Tačiau neįmanoma šio darbo atlikti be šiluminių energijos nuostolių. Kitaip sakant turi būti **šilumos nuotakas.** 15.15 pav. atvaizduotas energijos šiluminis perdavimas šilumos nuotakui.



15.16 pav. **Karno ciklas idealioms dujoms, sudarytas iš dviejų izotermių AB ir CD bei dviejų adiabačių BC ir DA**

Karno ciklas

Galime sudaryti dviejų izotermių ir dviejų adiabačių (pokyčių pavadinimai) derinį, kad susidarytų uždaras ciklas. Jis vadinamas **Karno ciklu** (15.16 pav.). Pasibaigus uždaram ciklui, atsiduriame ties tuo pačiu slėgiu, tūriu ir temperatūra, nuo kurių pradėjome. Karno ciklas nėra vienintelis ciklas, kurį galime pavaizduoti pV diagramoje, kadangi gali būti pokyčių, esant pastoviam tūriui ar pastoviam slėgiui, arba kitokių pokyčių, šalia izoterminių bei adiabatinių pokyčių. Jei judame ciklu pagal laikrodžio rodyklę, kaip pavaizduota, tai matome, kad dujos atlieka darbą su savo aplinka, lygų ciklo ribojamam plotui.

?

F Sudarykite *pV* diagramoje uždarus ciklus, naudodami izoterminius, adiabatinius, pastovaus slėgio arba pastovaus tūrio pokyčius. Apsiribokite savo cikluose trimis arba keturiomis kraštinėmis. Net esant šiam apribojimui, yra daugybė galimybių

Karno mašina

Termodinamika apriboja darbą, kuris gali būti išgaunamas tarp karšto šaltinio ir šalto nuotako. Variklis, veikiantis pagal Karno ciklą (15.16 pav.), sudarytą iš dviejų adiabačių ir dviejų izotermių, yra pats našiausias variklis, kokį tik galima sukurti. Jis turi svarbų bruožą: jo veikimas gali būti apgręžtas. Jis vadinamas **Karno mašina** ir yra standartas, su kuriuo lyginami kiti varikliai. Karno mašina tikrovėje egzistuoti negali, – ji tėra įsivaizduojamas idealus variklis, kuriame nėra tokių energijos nuostolių, atsirandančių dėl trinties ir laidumo.

Karšto šaltinio ir šalto nuotako temperatūros yra lemiami veiksniai darbo kiekiui, kurį galima išgauti. To gal ir tikėtumės, kadangi iš kasdienės patirties žinome, jog kai inžinieriai projektuoja vidaus degimo variklius arba jėgainės turbinų veikimą, jie stengiasi gauti aukštas temperatūras įėjime.

Pasirodo, kad galime apibrėžti šaltinio temperatūrą T_h ir nuotako temperatūrą T_c, išreiškę jas perduotų šiluminių energijų Q_h ir Q_c santykiu:

$$\frac{T_h}{T_c} = \frac{Q_h}{Q_c}$$

Atkreipkite dėmesį, kad temperatūros T_h ir T_c matuojamos kelvinų skalėje, – tai *labai svarbu*. Nors ir negalime čia detalizuoti, šis sąryšis tarp temperatūrų bei gaunamos ir atiduodamos energijų gali būti panaudotas termodinaminei temperatūros skalei apibrėžti, o toji skalė visiškai atitinka skalę, apibrėžtą panaudojus pastovaus tūrio dujų termometrą ir trigubąjį tašką.

Naudingumo koeficientas

Variklio naudingumo koeficientas apibrėžiamas šitaip:

$$\frac{\text{variklio atliktas darbas}}{\text{energija, suteikta varikliui}} \times 100\%,$$

arba

$$\frac{W}{Q_h} \times 100\%$$

Bet atliktas darbas yra suteiktosios energijos ir energijos, perduotos nuotakui, skirtumas (energijos tvermė), t. y. $Q_h - Q_c$. Taigi variklio naudingumo koeficientas

$$\frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \times 100\% = (1 - \frac{Q_c}{Q_h}) \times 100\%$$
$$= (1 - \frac{T_c}{T_h}) \times 100\%$$

?

G Vidaus degimo variklis veikia, esant aukštoms įsiurbimo ir išmetimo temperatūroms. Apskaičiuokite variklio naudingumo koeficientą, kai jis veikia intervale tarp 3000 °C ir 1000 °C. Kaip galėtų būti padidintas šio variklio naudingumo koeficientas? Kodėl 100 procentų naudingumo koeficientas yra nepasiekiamas?

■ Žr. 7 ir 8 klausimus.

PAVYZDYS

K Jėgainė vartoja maždaug 500 °C perkaitintus garus (aukšto slėgio). Šaltasis nuotakas atitinka temperatūrą, kurioje garai kondensuojasi, esant normaliam slėgiui, t. y. 100 °C. Koks yra maksimalus teorinis jėgainės naudingumo koeficientas?

A Remiantis naudingumo koeficiento lygtimi,

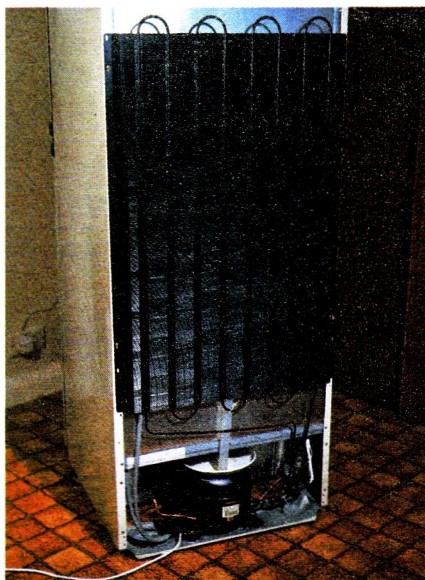
$$\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \times 100\%,$$

$$\text{naudingumo koeficientas} = \left(1 - \frac{373}{773}\right) \times 100\%$$
$$= (1 - 0{,}48) \times 100\%$$
$$= 52\%$$

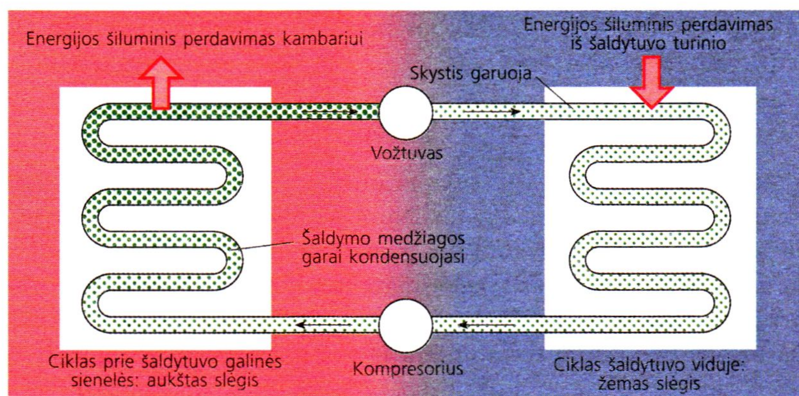
Šaldytuvai ir šilumos siurbliai

Minėjome, kad Karno mašina yra apgręžiama. Realiame gyvenime ciklus vykdome priešinga kryptimi, kai norime paimti energiją iš šalto šaltinio ir atiduoti energiją aukštesnės temperatūros talpyklai. Šaldytuvai ir šaldikliai taip ir daro (15.17 pav.). Jų aušinimo ciklas susijęs su skysčio, turinčio žemą virimo tašką, garinimu šaldytuve. Energija šiam garinimui atsiranda iš šaldytuvo turinio vidinės energijos, tačiau mums reikalingas darbo šaltinis.

Garas kondensuojamas, panaudojant kompresorių. Žinoma, kompresorius atlieka darbą, vartodamas energiją iš elektros tinklo. Garus slegiant ir kondensuojant, jie šyla ir praranda (išsklaido) savo energiją ilgame metaliniame vamzdelyje prie šaldytuvo už galinės sienelės. Taigi vidinė energija, išgauta iš maisto, išsklaidoma elemento, kuris šyla šaldytuvo užpakalinėje pusėje. Vadinasi, šaldytuvas šildys kambarį, kuriame stovi.



15.17 pav. **Buitinio šaldytuvo galinė sienelė: apačioje matyti kompresorius ir vingiuotas vamzdis, kuriuo cirkuliuoja šaldymo medžiaga**



Šaldytuvo veikimas atvaizduotas 15.18a) pav. taip pat, kaip šiluminis variklis. Naudingumo koeficientas, arba **poveikio koeficientas** (šis terminas tikslesnis, kadangi vertės gali būti didesnės kaip 100 procentų), apibrėžiamas taip:

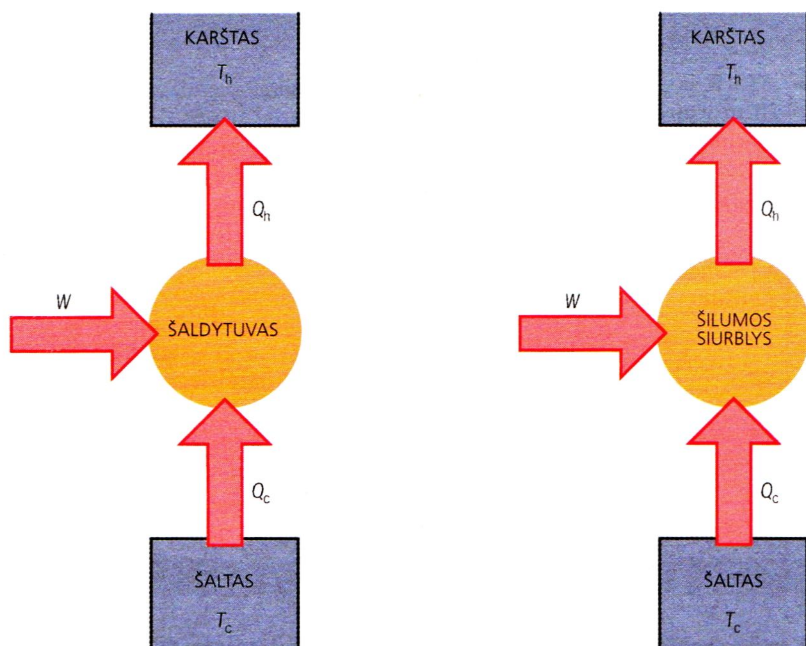
$$\frac{\text{energija, išgauta iš šalto šaltinio}}{\text{kompresoriaus atliktas darbas}} = \frac{Q_c}{W}\times 100\% = \frac{Q_c}{(Q_h - Q_c)}\times 100\% = \frac{T_c}{(T_h - T_c)}\times 100\%$$

Šiluminis siurblys, kaip atvaizduota 15.18b) pav., veikia panašiai kaip šaldytuvas, šiluminiu būdu išgaudamas energiją iš šalto šaltinio, pvz., upės, ir suteikdamas ją kūnui, pvz., namui, kurio temperatūra aukštesnė. Čia mus domina energijos kiekis, suteiktas namui, o ne iš upės išgautas jos kiekis, todėl procentinį poveikio koeficientą apibrėžiame šitaip:

$$\frac{\text{energija, suteikta karštesniam kūnui}}{\text{siurblio atliktas darbas}} = \frac{Q_h}{W}\times 100\% = \frac{Q_h}{(Q_h - Q_c)}\times 100\% = \frac{T_h}{(T_h - T_c)}\times 100\%$$

?

H Išmatuokite būdingas temperatūras, esančias virtuvėje bei virtuvės šaldytuve, ir įvertinkite teorinį šaldytuvo poveikio koeficientą.



a) Veikimo koeficientas $= \frac{Q_c}{W} \times 100\% = \frac{T_c}{T_h - T_c} \times 100\%$

b) Veikimo koeficientas $= \frac{Q_h}{W} \times 100\% = \frac{T_h}{T_h - T_c} \times 100\%$

15.18 pav. **Energijos perdavimas** a) **šaldytuve ir** b) **šilumos siurblyje**

Sprendžiant iš šios lygties, šilumos siurblys atrodo labai patraukliai. Nedidelis atliktas darbas gali perduoti didelį šiluminės energijos kiekį. Praktikoje tikri šilumos siurbliai pasirodo turintys kur kas mažesnį naudingumo koeficientą, nei Karno ciklu pagrįstas idealus šilumos siurblys. Be to, šilumos siurbliai brangiai kainuoja – iš dalies todėl, kad jų negaminama dideliais kiekiais.

Ir dar, nors energija gali būti nuolat išgaunama šiluminiu būdu iš šalia esančios upės (tarus, kad upė neužšąla), vidinės energijos išgavimas iš kitų šaltinių, pavyzdžiui, iš šalia esančios dirvos, galėtų sukelti amžiną įšalą.

?

1 Tarus, kad šaldytuvas ir šilumos siurblys gali veikti su tais pačiais karštu šaltiniu ir šaltu nuotaku, įrodykite, jog šilumos siurblio veikimo koeficientas yra lygus 1 + šaldytuvo veikimo koeficientas.

Šilumos siurbliai ir entropija

Jau matėme, kad entropija yra netvarkos matas. Kai energija šiluminiu būdu perduodama kūnui, tai padidina netvarką.

Geriausiai galime išmatuoti entropiją, kai temperatūra išlieka pastovi. Pavyzdžiui, tarkime, kad energiją suteikiame šiluminiu būdu kietajam kūnui ties jo lydymosi tašku. Gaunamas skystis yra labiau netvarkus nei kietasis kūnas, o molekulės atsitiktinai juda įvairiausiais greičiais. Galima parodyti, kad **entropijos pokytis** ΔS yra susijęs su šiluminės energijos pokyčiu ΔQ šitaip:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T},$$

■ Žr. 9 klausimą.

kur T yra temperatūra, matuojama kelvinų skalėje.

Galime laikyti temperatūrą pastovia ir tada, kai energiją išgauname iš didelės talpyklos ar ją atiduodame. Kai temperatūra nėra pastovi, rasti entropijos pokytį darosi sunkiau (ir paprastai pasitelkiama analizė).

Galime panagrinėti entropijos pokytį, vykstantį veikiant šiluminiam varikliui. Čia darome prielaidą, kad karštasis šaltinis ir šaltasis nuotakas lieka pastovios temperatūros.

PAVYZDYS

K Šiluminis variklis veikia diapazone nuo 373 K iki 300 K, o jo naudingumo koeficientas yra 18 procentų. Koks bus entropijos pokytis, kai variklis atliks 1000 J darbą?

A Pirma surandame energijos perdavimą iš karšto šaltinio.

1000 J darbas atliekamas, esant 18 procentų naudingumui. Todėl iš karštojo šaltinio turi būti perduota (100/18 × 1000) J. Tai reiškia, kad

$$Q_1 = 5560 \text{ J}$$

Karšto šaltinio entropijos nuostoliai

$$= Q_1/T = 5560/373 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$
$$= 14{,}9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Energija, kurią gauna nuotakas

$$= Q_2 = Q_1 - W = (5560 - 1000) \text{ J}$$
$$= 4560 \text{ J}.$$

Nuotako gaunama entropija

$$= Q_2/T = 4560/273 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$
$$= 16{,}7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Bendras entropijos pokytis

$$= 1{,}8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Kaip jau įpratome manyti, yra bendras entropijos padidėjimas.

5 GALŲ GALE – TREČIASIS DĖSNIS

Yra ir trečiasis termodinamikos dėsnis. Jis teigia:

Sistemos entropija artėja prie pastovios vertės (paprastoje sistemoje – prie nulio), temperatūrai artėjant prie absoliutinio nulio.

Nulio temperatūrai pasiekti reikia begalinio žingsnių skaičiaus: turime išgauti truputį energijos, ir dar truputį, ir dar, ir taip toliau. Praktiška dėsnio formuluotė yra tokia:

Neįmanoma pasiekti absoliutinio nulio temperatūros baigtiniu žingsnių skaičiumi.

Šio skyriaus pradžioje išgirdome, kad yra pasiekta 100 milijardinių kelvino dalių žemumo temperatūra. Trečiasis dėsnis mus užtikrina, kad niekada nepasieksime 0 K.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėtumėte sugebėti:

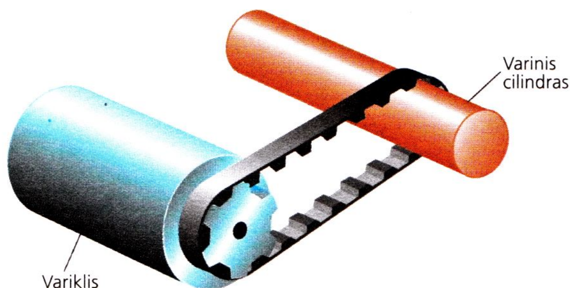
- Pateikti nulinio dėsnio formuluotę ir nurodyti jo taikymą, matuojant temperatūrą.
- Pateikti pirmojo dėsnio formuluotę ir pritaikyti lygtį $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$.
- Atlikti izoterminių (pastovios temperatūros) ir izobarinių (pastovaus slėgio) idealių dujų pokyčių skaičiavimus.
- Skaičiavimuose pasinaudoti sąryšiu tarp idealių dujų C_V ir C_p.
- Panaudoti (ne išvesti) sąryšį pV^{γ} = konstanta idealių dujų tūrio adiabatinio pokyčio skaičiavimuose.
- Pateikti antrojo dėsnio formuluotę ir paaiškinti jo svarbą.
- Žinoti entropijos $S = k \ln W$ ir entropijos pokyčio $\Delta S = \Delta Q/T$ sąvokas bei apskaičiuoti ΔS vertes paprastiems taikymams.
- Suprasti principus, kuriais grindžiami šiluminiai varikliai, šaldytuvai ir šilumos siurbliai, ir atlikti paprastus skaičiavimus, taip pat rasti naudingumo koeficientą (arba poveikio koeficientus).

KLAUSIMAI

Kai kurie klausimai privers jus grįžti prie 14 skyriaus.

1 Vidinė sistemos energija gali būti padidinta, ją šildant arba su ja atliekant darbą. Pateikite kiekvieno atvejo pavyzdį. Kad būtų šildoma, reikalingas temperatūrų skirtumas. Kas dar reikalinga, kad vyktų šildymas?

15.K1 pav. atvaizduotas variklio varomas diržas, lėtai besitrinantis į varinio cilindro paviršių. Cilindras įkaista. Moksleivis A neteisingai sako, kad variklis kaitina diržą, kuris kaitina cilindrą. Moksleivis B teisingai sako, kad variklis atlieka su diržu darbą, o tas atlieka darbą su cilindru. Konstatuokite matavimus, kurių galėtumėt imtis, kad įrodytumėte, jog teisus moksleivis B.



15.K1 pav.

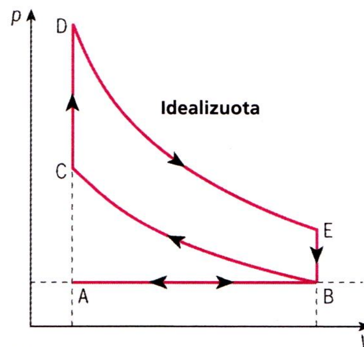
Diržas slenka cilindro paviršiumi 70 mm · s^{-1} greičiu, o įtempimo skirtumas tarp abiejų diržo pusių yra 14 000 N. Paaiškinkite, kodėl darbo greitis yra 980 W.

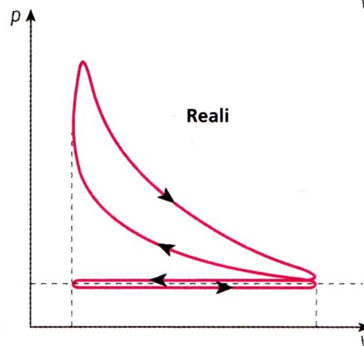
Cilindro masė 300 g, o savitoji šiluma 390 J · kg^{-1} · K^{-1}. Apskaičiuokite, kiek laiko užtruks iki temperatūra pakils 5 K. Kokią prielaidą padarėte šiame skaičiavime?

Kiek pajudėjo diržas per laiką, kurį truko šis temperatūros pakilimas? Pasinaudokite šiuo atsakymu, pateikdami dar vieną priežastį, dėl kurios moksleivio B energijos perdavimo apibūdinimas yra priimtinesnis nei moksleivio A.

2 Penki 300 K temperatūros idealių dujų moliai, esantys 3,0 m^3 tūryje, išsiplečia iki 6,0 m^3. Milimetriniame popieriuje nubraižykite p priklausomybės nuo V grafiką ir įvertinkite besiplečiančių dujų atliktą darbą. Pasinaudokite ΔW išraiška, pateikta išplėstinio intarpo skiltyje 321 p., skaičiuodami atliktą darbą. Palyginkite dvi gautąsias vertes.

3 15.K3 pav. atvaizduota idealizuota ir reali keturtakčio vidaus degimo variklio kontrolės prietaisų rodmens diagrama. Konstatuokite ir paaiškinkite tris šiųdviejų diagramų skirtumus.





15.K3 pav.

4 Idealios 300 K dujos adiabatiškai suslegiamos iki pusės savo pirmykščio tūrio, o vėliau aušinamos, esant pastoviam tūriui, iki slėgis atstatomas iki savo pirmykštės vertės. Kokia temperatūra bus pabaigoje?

5 Idealios dujos yra tuščiaviduriame cilindre su vienu uždaru galu ir su stūmokliu be trinties kitame gale. Iš pradžių dujos užima 1,0 × 10^{-3} m^3, esant 200 kPa slėgiui ir 300 K temperatūrai.

a) Dujos izotermiškai šildomos. Kaip suteiktoji šiluminė energija Q susijusi su vidinės energijos pokyčiu ΔU ir dujų atliktu darbu W? Paaiškinkite savo atsakymą. Ar dujos plėsis, ar reikės įstumti stūmoklį?

b) Kiek molių dujų yra cilindre?

c) Cilindras naudojamas kaip Stirlingo variklis, atitinkamai prijungus stūmoklį. Dujos patiria šitokį pokyčių ciklą:

- **(i)** izotermiškai suslegiamos iki pusės pradinio tūrio,
- **(ii)** pašildomos, esant pastoviam tūriui, iki 450 K,
- **(iii)** izotermiškai išplečiamos vėl iki pradinio tūrio,
- **(iv)** ataušinamos, esant pastoviam tūriui, iki pradinės būsenos.

Apskaičiuokite slėgį kiekvienos stadijos pabaigoje. Nubraižykite pV diagramą, ir parodykite, kad dujos patiria šiuos keturis procesus.

d) Paaiškinkite, kaip galėtumėte pasinaudoti ta pV diagrama rasti Stirlingo variklio šiluminiam naudingumo koeficientui, kuris gali būti apibrėžtas taip:

$$\frac{\text{(dujų atliktas darbas)} - \text{(su dujomis atliktas darbas)}}{\text{dujų atliktas darbas}}$$

6

a) Idealios dujos, kurių pradinės savybės p_1, V_1 ir T_1, adiabatiškai plečiasi iki būsenos, kurios savybės yra p_2, V_2 ir T_2.

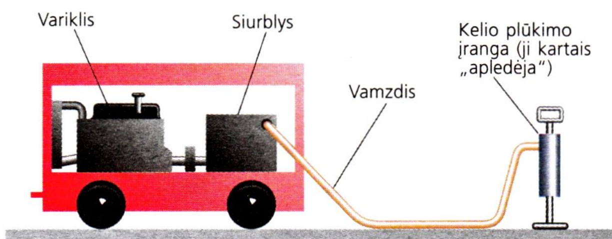
(i) Užrašykite lygtį, siejančią p_1, V_1 ir T_1 su p_2, V_2 ir T_2.

(ii) Užrašykite lygtį, siejančią p_1, V_1, p_2 ir V_2.

b) Užrašytosios lygtys gali būti sujungtos į vieną:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{[(\gamma-1)/\gamma]}$$

kur γ yra dujų savitųjų šilumų santykis. Siurblys didina oro slėgį kelių tiesimo įrangai, nuo atmosferinio slėgio 1×10^5 Pa iki 4×10^5 Pa absoliutinio slėgio (15.K6 pav.). Siurblys veikia beveik adiabatiškai. Aplinkos temperatūra yra 280 K. Įvertinkite oro temperatūrą tuoj po suslėgimo.



15.K6 pav.

c) Tarkime, oro temperatūra jo padavimo į pneumatinę kelių statybos įrangą vamzdžiuose nukrinta iki aplinkos temperatūros, prieš jam pasiekiant įrangą. Paaiškinkite, kodėl darbininkai kartais susiduria su įrangos „apledėjimu", išleidus orą.
(Pagrindinių oro savitųjų šilumų santykis (γ) = 1,4.)

7

Šiluminis variklis, veikiantis tarp dviejų talpyklų, turi 25 procentų naudingumo koeficientą ir kiekvieno ciklo metu atlieka 3500 J darbą su aplinka. Apskaičiuokite energijos kiekį, absorbuotą kiekvieno ciklo metu iš karštosios talpyklos, ir kiekį, kiekvieno ciklo metu atiduotą šaltajai talpyklai.

8

Išradėjas teigia sukonstravęs ciklinį variklį, veikiantį tarp dviejų 490 K ir 340 K temperatūros talpyklų. Kiekviename cikle variklis išgauna 8000 J energijos iš aukštatemperatūrės talpyklos ir suteikia 5200 J energijos į žemosios temperatūros talpyklą, atlikdamas tuo tarpu 2800 J darbą su aplinka. Ar ryžtumėtės šį projektą finansiškai remti? Pagrįskite savo atsakymą skaičiavimais ir atminkite, kad pats našiausias variklis yra Karno variklis.

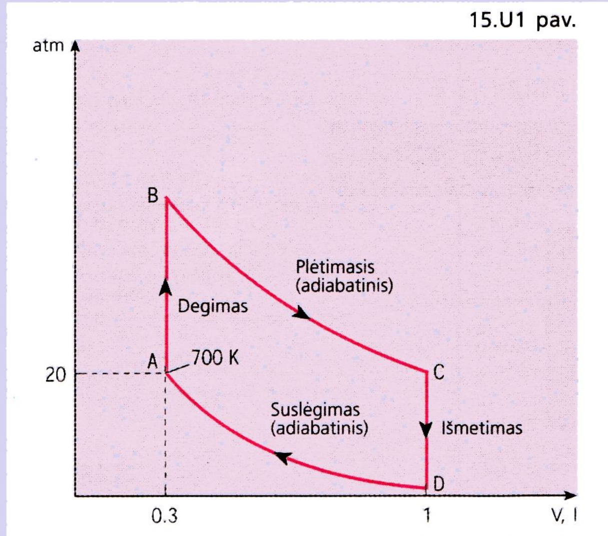
9

2400 J energijos kiekis perduodamas iš šildytuvo, esančio pastovios 600 K temperatūros, alyvai, kurios temperatūra 400 K. Kiek pakis šildytuvo entropija, išreiškiant $J \cdot K^{-1}$?

Užduotis

VIDAUS DEGIMO VARIKLIO *PV* DIAGRAMA

Ši užduotis yra apie Otto ciklą, kuris panašus į ciklą, naudojamą vidaus degimo variklyje.



Vienas iš ciklo faktų yra degimo taktas AB, kuris vyksta, esant pastoviam tūriui (žr. 15.U1 pav. pavaizduotą diagramą). Yra adiabatinis taktas BC, kuriame perduodama galia, išmetimo taktas CD, esant pastoviam tūriui, ir adiabatinis suslėgimas DA link pradinio ciklo taško A. Jūs naudositės skaičiuokliu ir milimetriniu popieriumi, gilindamiesi į variklio, vykdančio šį ciklą, veikimo sąlygas ir patį veikimą.

Ciklo taške A variklio kameros tūris yra 0,3 litro, temperatūra 700 K, o dujų slėgis yra 20 atmosferų. Taške B po degimo slėgis yra 200 atmosferų, o po plėtimosi (taškuose C ir D) kameros tūris yra 1 litras. Atkreipkite dėmesį, kad 1 atmosfera apytiksliai yra 1×10^5 Pa, o 1 litras yra 10^{-3} m^3, tačiau tuo tarpu vartosime šiuos kasdienius atmosferos ir litro vienetus.

1 Žinodami A ir B padėtis *pV* diagramoje, turite gauti duomenų linijoms BC ir AD nubrėžti. Išilgai BC pV^γ = konstanta$_1$, o išilgai AD pV^γ = konstanta$_2$. Dujų, naudojamų degimo variklyje, γ vertę imame lygią 1,4.

a) Naudodamiesi savo skaičiuoklio x^y mygtuku, gaukite skaitines konstantos$_1$ ir konstantos$_2$ vertes.

b) Toliau naudokitės skaičiuokliu ir pagal konstantos$_1$ ir konstantos$_2$ vertes gaukite slėgio, atitinkančio tūrius 0,6, 1,0 ir 2,1 (litrų) vertes adiabatiniam plėtimuisi BC ir adiabatiniam suslėgimui DA. (Gavus vertes BC, tikriausiai jums pasirodys lengva užrašyti vertes AD.)

c) Tada nubraižykite kontrolinio manometro rodmenų diagramos ABCD brėžinį su padalomis.

2 Sakykime, kad tinka idealiųjų dujų lygtis $pV = nRT$; pasinaudokite sąlygomis, esančiomis

a) ties A, skaičiuodami temperatūrą ties B,

b) ties A, skaičiuodami temperatūrą ties D,

a) ties D, skaičiuodami temperatūrą ties C.

Linijos BC ir AD vaizduoja adiabates. Sugalvoję, kaip galėtų grafike atrodyti izoterminės linijos, pasvarstykite, ar jūsų apskaičiuotos temperatūros T_B, T_D ir T_C realios.

3 Naudodamiesi idealiųjų dujų lygtimi $pV = nRT$ kuriame nors konkrečiame taške (tarkim, A), apskaičiuokite dujų molių skaičių kameroje. Tam turėsite pervesti atmosferą ir litrą į SI vienetus. Tai galima padaryti, prisiminus, kokį tūrį užima 1 molis idealių dujų, esant normaliai temperatūrai ir slėgiui.

4 Žinoma, kad dujų savitoji šiluma C_V yra 20,8 J × mol^{-1} × K^{-1}. Šiluminiu būdu gauta energija yra $Q_{in} = nC_V(T_B - T_A)$, o šiluminiu būdu dujų atiduota energija yra $Q_{iš} = nC_V(T_C - T_D)$. Apskaičiuokite Q_{in} ir $Q_{iš}$.

5 Variklio naudingumo koeficientas (%) gaunamas pagal (grynas darbas/Q_{in}) × 100, kur grynasis darbas lygus $Q_{in} - Q_{iš}$. Apskaičiuokite Otto variklio naudingumo koeficientą. Paaiškinkite, kodėl iš tikrųjų vidaus degimo variklio naudingumo koeficientas yra daug mažesnis.

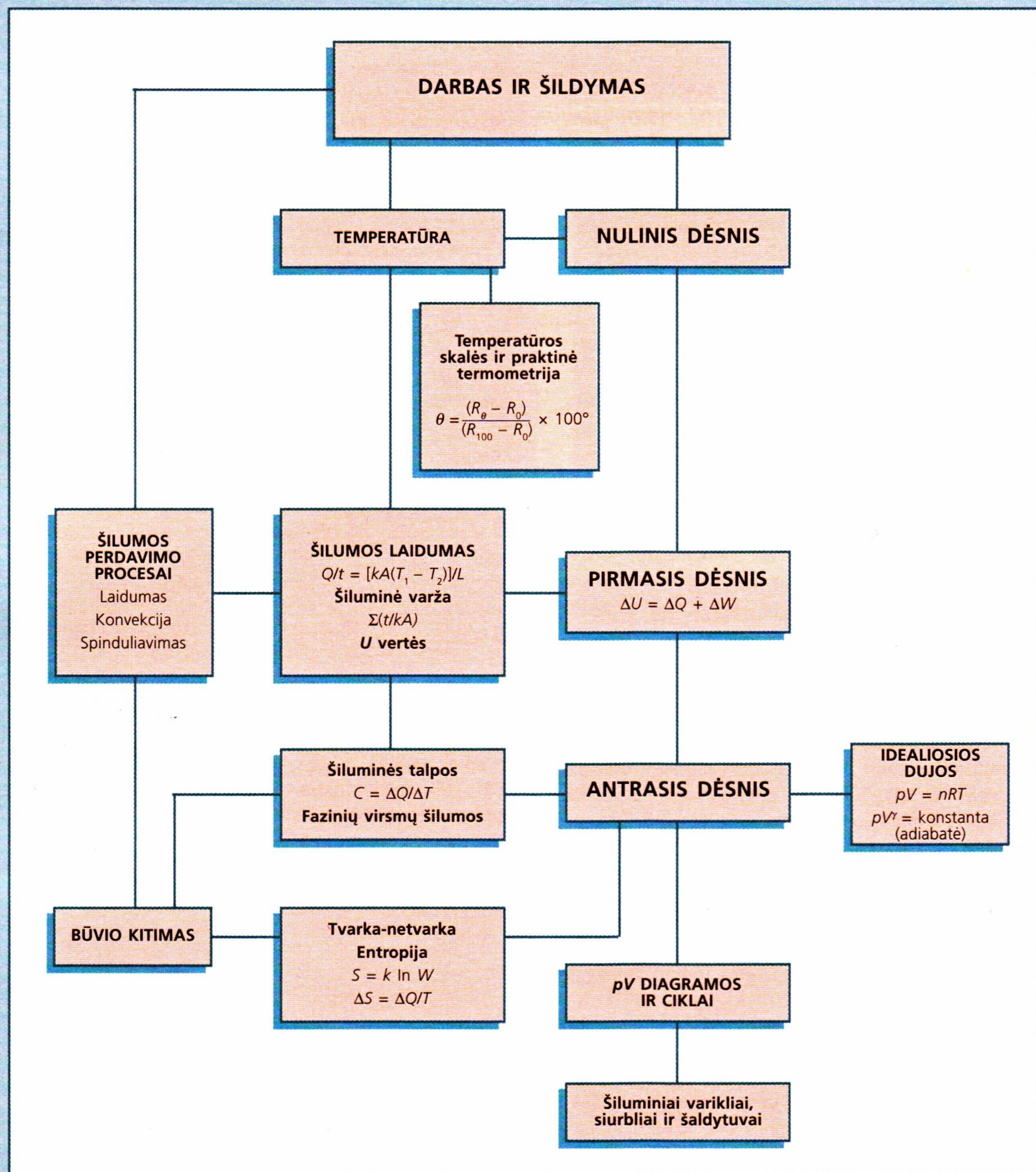
6 Apskaičiuokite idealaus (Karno) variklio naudingumo koeficientą, kai jis veikia diapazone tarp aukščiausios temperatūros (T_B) ir žemiausios temperatūros (T_D). Palyginkite šią vertę su verte, gauta Otto varikliui (**5** klausimas), ir pakomentuokite skirtumą.

7 Variklio atliekamas grynasis darbas lygus plotui, kurį apibrėžia jūsų *pV* diagrama. Įvertinkite šį plotą. Tai atlikite, įvertindami kvadratėlių, kuriuos apima jūsų grafikai, skaičių, ir raskite kvadratėlių dydį *pV* vienetais (Pa · m^3). Pasitikrinkite, ar jūsų gauta atlikto darbo vertė sutampa su panaudotąja **5** klausime.

8 Pasirinkę būdingą ciklų dažnį, įvertinkite šio idealaus Otto variklio galią.

ENERGIJA, TEMPERATŪRA IR TERMODINAMIKOS DĖSNIAI

Šio skyriaus schemoje pateiktos sąvokos, kurias nagrinėjote 14 skyriuje „Energija ir temperatūra" ir 15 – „Termodinamikos dėsniai". Įtrauktos svarbiausios sąvokos ir lygtys ir susietos tarpusavyje. Naudokitės schema pagal savo kurso programą kaip vadovu po svarbiausią informaciją, kurią turite žinoti ir suprasti. Naudodamiesi schema išsiaiškinkite klausimus, kuriuos jums reikėtų nuodugniau panagrinėti.



2 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A $2,2 \times 10^6$ m.
B $1,7 \times 10^{-4}$ s
H 5 s
I **a)** 96 m, **b)** 2,7 m
K **a)** 6 s
M **a)** 0,8 m, **b)** 100 m
P 510 km × h^{-1} 80° š. kryptimi

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 **a)** 500 km, **b)** 261 s
3 **b)** 1 ns
4 Sirijus 8,63 šm, Kentauro Alfa 4,38 šm
5 120 m × s^{-1}
8 110 m
9 **b)** –0,453 m × s^{-2}
10 Pastaba: atstumas iki Marso yra 8×10^{10} m, o ne 5×10^8 m.
a) 7920 km, **b)** 6 h, **c)** 21,5 m.
d) **(i)** 1400 s (1360 s), **(ii)** $1,36 \times 10^7$ m, **(iii)** 46 dienos
11 **b)** 150 m
12 38 m
14 380 km × h^{-1}
15 5,7 mazgo 30° š. kr.

3 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

E **a)** 2,1 N × s, **b)** 2,1 N × s, **c)** **(i)** 14 N, **(ii)** 14 N
F 5 N × s
G 2,4 kg
H **a)** 3 kg, **b)** 29 N
K **a)** 0,25 m
M 5,3 s
R **a)** 12 m × s^{-1}
c) Kris ties riba (Kodėl?)
S 16 m × s^{-1}
U 112 km

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 **a)** 29 m × s^{-1}, **b)** 88 m
7 **a)** 28,0 N, **b)** 5,83 m × s^{-2}, **c)** 5,83 m × s^{-2}
10 14 m × s^{-1}
11 **b)** 1,2 s, **c)** 7,3 m
14 **a)** 28 m × s^{-1}, **b)** 870 m × s^{-2}
15 **a)** 10 s, **b)** 44,5 m, **c)** **(i)** 30 m × s^{-1}, **(ii)** 3 s
16 **a)** **(i)** 240 N, **(ii)** 240 N, **b)** 0,8 m × s^{-1}
18 **a)** $3,1 \times 10^{11}$ m × s^{-2}, **b)** $2,8 \times 10^{-19}$ N
21 **a)** 2×10^{20} N, **b)** $2,7 \times 10^{-3}$ m × s^{-2}

4 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

C **a)** 196 J
D **a)** 18,5 J, **c)** 6 m × s^{-1}
F **b)** 5050 kJ
J **b)** 7,9 km × s^{-1}
K **a)** 7,7 km × s^{-1}, **b)** 93 min., **c)** 15,5
L $1,3 \times 10^8$ m (pastaba: Mėnulio diena trunka 27,3 Žemės dienų)

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 **a)** 1000 N
4 **a)** 10 m × s^{-1}, **b)** 18 J arba 36%
6 **a)** 0, **b)** 6 kJ
7 0,18 J
8 **b)** ~10^7 J × kg^{-1},
c) Atitrūkimo greitis: 5 km × s^{-1},
(i) $8,862 \times 10^4$ s, **(ii)** $2,04 \times 10^7$ m
9 1,5 km
11 **a)** **(i)** $1,4 \times 10^3$ m × s^{-1}, **(ii)** $6,9 \times 10^3$ m × s^{-1}, **b)** $2,2 \times 10^{12}$ s
13 15 kN

5 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

B 8,5 vnt., 4,7° š. kr.
D 15,2 m
I 210 N
J **a)** 2,5 mm, **b)** 21 mm

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 **a)** 1,39 kN tempimo j., 1,60 kN gniuždymo j.
2 **a)** 0,5 m, **b)** 1 m
3 **a)** $3,0 \times 10^8$ N × m^{-2}
4 **a)** 0,25 mm, **b)** 22,5 kN
5 **a)** **(i)** 50 kN, **(ii)** 10^7 N × m^{-2}, **(iii)** 5×10^{-5}
6 **c)** 14, **d)** 1,3 J, **e)** $1,4 \times 10^3$ N × m^{-1}
10 170 J
16 1,7 m^3

6 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 800 Hz
J **a)** 700 Hz, **b)** 1400 Hz
H 1,2 Hz, 0,83 s
L **a)** 32 cm, **b)** 16 cm
I 1,6 cm
M 258,5 Hz, 253,5 Hz

Klausimai skyriaus pabaigoje

5 1,3 km × s^{-1}, $1,0 \times 10^{16}$ m × s^{-1}
6 8,2 cm
7 30 m × s^{-1}
9 **a)** 288 Hz, **b)** 30 N, **c)** 8 Hz
10 **c)** 28 Hz

7 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

B 0,148 arba 1:6,8
C **a)** 6,8 MJ, **b)** 14 pensų
F $\pi/4:\pi/2\sqrt{3}$ arba 1:1,15
G 4
J **a)** 900 m × s^{-1},
b) 0,4,
c) 0,04 (apytiksliai)

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 **b)** 7,3% (apytiksliai) **c)** 5×10^{-21} J
2 **b)** **(ii)** $2,6 \times 10^{-10}$ m, $3,7 \times 10^{-20}$ J
3 **b)** **(i)** $1,35 \times 10^{-20}$ J, **(ii)** 3,04 kJ, **(iii)** $1,28 \times 10^{-20}$ J, **c)** ~2×10^{18} m^{-2}, **d)** nuo 10^{-9} iki 10^{-10} m
6 26,6 lb × in^{-2} (≡ $1,83 \times 10^5$ Pa)
7 **b)** **(ii)** 418 m × s^{-1}, **(iii)** $0,93 \times 10^5$ Pa,
c) **(i)** $\sqrt{10}$
8 **a)** 430 m × s^{-1}, **b)** 11 kJ
9 **b)** 480 m × s^{-1}, **d)** $1,7 \times 10^{-10}$ Pa,
c) 3,1 h (10^4 s)

8 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A Ar jūs plokščiapėdis? Maždaug 10^5 N × m (Pa)
B 7,8 m × s^{-2} (visada μg!)
D **a)** π rad × s^{-1}, **b)** 47 m × s^{-1}
E 375 kg × m^2
H 3×10^4 Pa
I 1,2 kPa
N 100 m × s^{-1}
O Apie 400 km! (Kur čia klaida?)

Klausimai skyriaus pabaigoje

3 **a)** $1,4 \times 10^4$ N, **c)** 7 m × s^{-2} (0,7 g), **d)** 4,4 s
4 **a)** 0,67, **b)** ~50 m
5 **a)** 2,4 rad × s^{-1}, **b)** 7,3 rad × s^{-1}, **c)** 3 kartus
7 **a)** 375 m × s^{-1}
14 8 MPa
15 **a)** 15 kPa, **b)** 45 kN, **c)** 27 kN
17 825 kg × m^{-3}
18 **b)** **(iii)** 0,038 J × s^{-1}, **(iv)** $8,5 \times 10^{-2}$ N × s × m^{-2}
19 **b)** **(i)** 1 kN, **(ii)** 40 kW

9 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

C $6,2 \times 10^{18}$
D **a)** 0,5 A, **b)** 2 mA, **c)** 40 nA
E **a)** 8×10^4 C, **b)** 4320 C, **c)** 100 μC
F Santykis = 1 (dreifo greitis vienodas)
H 100
I Varžos vienodos
J 12 V lemputės siūlelis 20 kartų storesnis nei 240 V lemputės
K Varžų santykis Fe : Cu = 5,2 : 1
L 3240 J
M 1 MΩ
N 0,42 A

Klausimai skyriaus pabaigoje

3 **a)** 2Ω, **b)** 1,44 J × s^{-1}
4 **a)** 6 V, **b)** **(ii)** 4,8 V, **c)** 4,8 V
5 **a)** 11 kΩ , **b)** 0,27 mA, **c)** ¾
6 **a)** **(ii)** prie skalės pabaigos
b) **(ii)** prie skalės pabaigos
7 **a)** 1 J, **b)** 1000 W, **c)** 100 A
8 **a)** 5000 μC, **b)** $\Delta T/RC = 0,1$, $\Delta Q = 500$ C,
c) 4500 μC, **d)** 450 μC, liks 4050 μC
10 **a)** ir **b)**
11 **a)** 0,6 mA,
b) **(i)** ≃12,5 kvadratėlio = 0,13 μC, **(ii)** 20 μC
12 **a)** 20 mA, **c)** 10 μC, **d)** 0,58 ms

10 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 10 V

C **a)** $1{,}6 \times 10^{-19}$ J, $1{,}6 \times 10^{-16}$ J, $1{,}6 \times 10^{-13}$ J, **b)** 1 eV, 1000 eV (1 keV), 1 000 000 eV (1 MeV)

E **a)** 180 V

F **a)** ~110 m^2, **b)** ~19 m^2

H $2{,}3 \times 10^{-8}$ N, maždaug 10^{18} vandenilio atomo svorio

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 **a)** 250 N × C^{-1}, **b)** $2{,}5 \times 10^3$ N × C^{-1}, **c)** 4×10^3 N × C^{-1}

2 **a)** 10 N, **b)** 0,1 N, **c)** $2{,}5 \times 10^{-4}$ N, **d)** $1{,}0 \times 10^{-7}$ N, **e)** $2{,}5 \times 10^{-10}$ N

3 **a)** 5000 V × m^{-1}, **b)** 5000 V × m^{-1}, **c)** 5000 V × m^{-1}

4 $2{,}5 \times 10^{-4}$ N

5 0,28 μC

6 $1{,}6 \times 10^7$ m × s^{-1}

7 **a)** ×2 **b)** jokio poveikio, **c)** ×2

8 **a)** 7,7 g; 4, 12, 8, 5, 10 ir 7, **b)** 5, 7, 3, 11, 9 ir 8.

9 **a)** 200 V × m^{-1}, **b)** 200 N × C^{-1}

10 **a)** plotas $1{,}13 \times 10^{-2}$ m^2, ilgis 0,57 m, **b)** 10 nC, **d)** pakaks dvigubai trumpesnių

11 **a)** **(i)** 27 pF, **(ii)** $1{,}3 \times 10^{-7}$ J, **b)** **(i)** $1{,}4 \times 10^{-5}$ N

12 4,8 μC

13 $2{,}3 \times 10^{-22}$ N, jėgų santykis $1{,}24 \times 10^{36}$

14 2 m, 67 nC

15 $4{,}6 \times 10^{-14}$ m

11 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 0,05 N

E **a)** $1{,}6 \times 10^{-3}$ m × s^{-1}, **b)** $3{,}1 \times 10^{-5}$ V. 0,1 mm nesutapimas atitiktų varžą $2{,}7 \times 10^{-5}$ Ω. Tekant 5A srovei, susidarytų 130 μV įtampos kritimas.

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 **c)** **(i)** 1×10^{-2} N, **(ii)** 0,1 N × m

3 **a)** 18,8 m, **b)** **(i)** 0,57 N, **(ii)** 0,028 mm

5 **b)** **(i)** $1{,}1 \times 10^{-7}$ s

7 **e)** $e/m = 1{,}7 \times 10^{11}$ C × kg^{-1}

8 **c)** **(i)** 0,21 m × s^{-1}, **(ii)** $3{,}2 \times 10^{-5}$ m^3 × s^{-1}

12 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 0,5 V

J 0,5 H

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 0,26 V

4 **a)** $7{,}5 \times 10^{-2}$ Wb, **b)** 0,75 A

5 D

6 srautas ir elektrovara **a)** ×2, **b)** ×1/2, **c)** ×1, **d)** ×2

7 **a)** varža ×1/2, **b)** magnetinė varža ×1/2

8 **c)** toks pat **d)** pradinė 0,5 A × s^{-1}, galutinė 0,67 A

9 **a)** 20:1 **b)** 0,15 A

13 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 322 V

B 11,4 V

C **a)** 1:10 **b)** Srovė sumažės 10 kartų, energijos nuostoliai sumažės 100 kartų

D **a)** 159 Ω, **b)** 1,6 Ω, **c)** 0,16 Ω

E **a)** $6{,}3 \times 10^{-3}$ Ω, **b)** 0,63 Ω, **c)** 6,3 Ω

F **a)** 101 Ω, 100 Ω, **b)** 100,2 Ω, 7,9 kΩ

G 225 kHz

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 **a)** 20 V, **b)** 14,1 V, **c)** 100 Hz

3 53 Ω, efektinė srovė 4,4 A

4 **a)** 4 V, **b)** 1,7 kHz, **c)** 28 mA

5 **a)** 14,4 V, **b)** 20,3 V, **c)** 18,9 V, **d)** 100 Hz, **e)** **(i)** RC nuo 1 s iki 0,01 s = pulsacijų periodas, įtampos gūbriai neišlyginti, **(ii)** kaip ir **(i)**

6 **a)** 265 μF, **c)** 4,2 mH, **d)** **(i)** 11 Ω, **(ii)** 13 Ω

7 **b)** 2 μF, 20 mH, **c)** **(i)** 8 Ω, 16 Ω, **(ii)** 1,3 kΩ, 630 Ω, **d)** apie 1 Ω (palyginti maža), paprastai L_2 = 200 μH, C_2 = 200 μF

8 **a)** 2,5 Hz, **b)** 8,6 H

14 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 184 J, 184 J

B 81,6 °C, 354,8 K

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 **a)** **(i)** 1,51 kJ, **(ii)** 0,187 kJ kg^{-1} × K^{-1}

2 **a)** 540 K × m^{-1}, 1,9 W, **b)** 190 K × m^{-1}, 0,66 W, **c)** 1,2 W

3 **b)** **(i)** 12,16 °C, 3,84 °C

4 **a)** 18,8 W, **b)** 12,6 °C, **c)** 9,7 W

5 **a)** 13 W × m^{-2} × K^{-1}, 12,5 W × m^{-2} × K^{-1}, **c)** 31 W × m^{-2} × K^{-1}

15 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

G 61%

H 1500% (apytiksliai)

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 0,6 s, 0,4 cm (nerealu)

2 8,6 kJ

4 150 K

5 **b)** 0,08 molio **c)** **(i)** 400 kPa, **(ii)** 600 kPa, **(iii)** 300 kPa, **(iv)** 200 kPa

6 416 K

7 14 kJ, 10,5 kJ

9 4 J × K^{-1}

UDK 53(075.3)
Do-51

Versta iš PHYSICS
by *Ken Dobson, David Grace, David Lovett*
HarperCollins Publishers Ltd, London

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos
rekomenduota 2001 02 09 Nr. 119

Iš anglų kalbos vertė
dr. *Andrius Bernotas*
hab. dr. *Gintautas Tamulaitis*

Redaktorė
Julija Rita Klimkienė

ISBN 9955-08-105-8 (1 dalis)
ISBN 9955-08-106-6 (bendras)

Ken Dobson, David Grace, David Lovett

FIZIKA

I DALIS

Viršelio dailininkė *Raimonda Bateikaitė*
Korektorės *Rita Martišienė, Aldutė Sidarkevičienė*
Kompiuteriu maketavo *Arūnas Šlikas*
Techninė redaktorė *Birutė Tolvaišienė*

Užsakymas 1148
Išleido leidykla „Alma littera", A. Juozapavičiaus g. 6/2, 2005 Vilnius
Interneto svetainė: www.almali.lt.
Spaudė AB spaustuvė „Spindulys", Gedimino g. 10, 3000 Kaunas
Interneto svetainė: www.spindulys.lt